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

Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

2021

№ 3

Theoretical and Applied Ecology

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

АГРОЭКОЛОГИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

http://envjournal.ru

Михаил Сергеевич Некрасов, генеральный директор «Нанолек»

10 ЛЕТ НА СТРАЖЕ ЗДОРОВЬЯ!

В этом году компании «Нанолек» в Кировской области исполнилось 10 лет. Биофармацевтический завод был построен в прекрасном природном массиве на территории цветущего поля, которое окружал чудесный лес.И сегодня вокруг корпусов действующего предприятия его руководство и сотрудники стараются сохранить всё то природное наследие, которое получили при его строительстве. При этом девиз тут такой: чтобы делать качественные лекарства, нужна качественная окружающая среда и грамотные и здоровые специалисты, имеющие возможность наслаждаться тем местом, где они проводят треть своей жизни.

Несмотря на сравнительно «молодой возраст», предприятие является одним из лидеров фармацевтического рынка в России и надёжным партнёром международных фармацевтических компаний. Главным замыслом основателей компании было стремление создавать эффективные медицинские технологии по локализации импортозамещающих лекарственных средств и производству инновационных препаратов собственной разработки. При производстве лекарственных препаратов во главу угла ставится качество, которое обеспечивается инновационными технологиями, современным оборудованием и высокой квалификацией персонала.

«Нанолек» специализируется не только на выпуске импортозамещающих и инновационных лекарственных препаратов, но является одним из лидеров по производству педиатрических вакцин в России, обладает уникальным опытом в области трансфера технологий, производства и коммерциализации вакцин, занимается собственными разработками. Кроме вакцин в портфель входят препараты для лечения ВИЧ, онкологических и орфанных заболеваний. Так, команда компании «Нанолек» получила недавно премию «Бизнес-событие», организатором которой является Союз Вятская Торгово-промышленная палата, за первый этап локализации препарата от трудноизлечимой формы рака крови. Препарат стал четвёртым по счёту в онкологическом портфеле компании.

«Нанолек» выпускает данный препарат совместно с крупной международной компанией «Янссен» (подразделение фармацевтических товаров ООО «Джонсон & Джонсон»). Благодаря партнерству с мировыми фармацевтическими компаниями у завода есть возможность быстро выводить на рынок препараты, которые востребованы российской медициной. «Ещё 15 лет назад мы не могли об этом даже мечтать. Тогда рак был приговором, а сейчас некоторые формы рака излечимы на 100%. И мы гордимся, что труд нашей команды был оценён премией «Бизнес-событие», – заявил М.С. Некрасов, генеральный директор «Нанолек».

Настоящий «Нанолек» – это не стены производственных корпусов, а прежде всего люди (средний возраст сотрудников 30 лет), которые по зову сердца объединены одной идеей. Они имеют колоссальные возможности, чтобы искать, пробовать, творить, производить, делиться, мечтать, создавать и спасать. Мы живём в веке высоких технологий, больших данных и всеобщей цифровизации, но при этом главная ценность – команда единомышленников. Все сотрудники компании, выбрав когда-то свой путь в фармацевтике, в ответе за жизнь и здоровье людей, которым ежедневно нужны лекарственные препараты.

Благодаря производственному комплексу, построенному в регионе, было создано более 800 высококвалифицированных рабочих мест, из них около 200 сотрудников являются выпускниками Вятского государственного университета, 35% сотрудников – это специалисты в области биотехнологий. У предприятия актуальное настоящее и большое востребованное будущее.

Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ
№ 3, 2021
http://envjournal.ru

Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (№ 2197 по состоянию на 12.07.2021).

Журнал включён в каталог периодических изданий Ульрих (Ulrinch'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* Л.И. Домрачева,** д.б.н., профессор Вятского государственного агротехнологического университета
***Зам. главного редактора* С.В. Дёгтева**, д.б.н., директор ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
***Зам. главного редактора* И.Г. Широких**, д.б.н., зав. лабораторией Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
***Зам. главного редактора* Б.И. Кочуров**, д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института географии РАН
***Ответственный секретарь* С.Г. Скугорева,** к.б.н., доцент, научный сотрудник 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 82027 в объединённом каталоге «Пресса России» и в интернет-каталоге Агентства «Книга-Сервис». 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, фото на 1-й, 3-й и 4-й стр. обложки – Александр Широких, перевод – Григорий Кантор, администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман, выпускающий редактор – Мария Зелаева.
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов
© Оформление. Издательство «О-Краткое»
12+

Дата выхода номера: 24.09.2021.
Тираж 250 экз. Заказ № 0954. Цена свободная.
Отпечатано в «Кировской цифровой типографии», ИП Плюснин Н.В.
Адрес типографии: 610017, Кировская область, г. Киров, ул. Молодой Гвардии, 57а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Theoretical and Applied ECOLOGY
No. 3, 2021

The journal is included in the list of the leading peer-reviewed journals and issues for publishing the main results of research for PhD and doctoral dissertations. The journal is included into Ulrich's Periodicals Directory, bibliographic databases Scopus (SourceID 21100828916), Web of Science Core Collection, RSCI on WoS, Google Scholar and Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is published since 2007.

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

***Editor-in-Chief* T.Ya. Ashikhmina,**
Doctor in Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher of Vyatka State University,
Head of Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
***Vice-Editor-in-Chief* L.I. Domracheva,**
Doctor in Biology, Professor
of Vyatka State Agrotechnological University
***Vice-Editor-in-Chief* S.V. Degteva,**
Doctor in Biology, Director of IB FRC Komi SC UB RAS
***Vice-Editor-in-Chief* I.G. Shirokikh,**
Doctor in Biology, Federal Agricultural Research Center
of North-East named N.V. Rudnitsky
***Vice-Editor-in-Chief* B.I. Kochurov,**
Doctor in Geography, Professor, Leading
Researcher of the Institute of Geography RAS
***Executive Secretary* S.G. Skugoreva,**
PhD in Biology, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
Technical Secretaries:
T.I. Kutyavina, PhD in Biology,
Senior Researcher of Vyatka State University,
V.V. Rutman,
Junior Researcher of Vyatka State University

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing. The editorial Board is not responsible for the accuracy of the information contained in advertisements.

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

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

Subscription index 82027 in the joint catalog "Press of Russia" and in the Internet catalog of the Agency "Book-Service".
To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC "MK-Periodica" in your country or to JSC "MK-Periodica" directly.
Address: 39 Gilyarovsky 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. Photo on 1st, 3rd and 4th pages of the cover – Aleksandr Shirokikh. Translation – Grigoriy Kantor.
Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman.
Managing editor – Mariya Zelayeva
Director of the publishing house "O-Kratkoe" Evgeniy Drogov
© Publishing house "O-Kratkoe".

12+

Release date: 24 September 2021.
Circulation 250 copies. Order No. 0954. Free price.
"Kirov digital printing house"
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, 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, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
M.V. Dorodnikov	PhD in Agricultural Sciences, Georg August University of Göttingen (Germany)
G.M. Zenova	Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
G.Ya. Kantor	PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
V.L. Kovalenko	PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
E.Yu. Kolbovsky	Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor of Lomonosov Moscow State University
E.I. Kolomiyets	Doctor in Biology, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
L.V. Kondakova	Doctor in Biology, Professor of Vyatka State University
V.A. Kotok	PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
A.V. Kuchin	Doctor in Chemistry, Corresponding Member of RAS, Professor, 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 of Kazan Federal University
Li Yu	Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)
S.G. Litvinets	PhD in Agricultural Sciences, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
V.A. Malinnikov	Doctor in Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
A.A. Moskalev	Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
S.V. Pestov	PhD in Biology, Associate Professor of Vyatka State University
V.S. Petrosyan	Doctor in Chemistry, Professor, Head of Laboratory of Moscow State University
S.A. Rubtsova	Doctor in Chemistry, Director of the Institute of Chemistry 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, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
V.A. Terekhova	Doctor in Biology, Leading Researcher of A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS
E.I. Tikhomirova	Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
T.A. Trifonova	Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
V.I. Kholstov	Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
B.H. Chojnicki	Doctor in Biology, Professor of Poznan University of Life Sciences (Poland)
M.H. Hussein	Doctor in Biology, Professor of University of Assiut University (Egypt)
V.T. Yungblud	Doctor in History, Professor of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

А. И. Иванов Экологические аспекты развития грибоводства в России 6

Т. Ю. Коршунова, Е. В. Кузина, Д. А. Шарипов, Г. Ф. Рафикова Бактерии родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* в процессах биоремедиации нефтезагрязнённых объектов (обзор) 13

Л. И. Домрачева, А. Л. Ковина, Л. В. Кондакова, Т. Я. Ашихмина Цианобактериальные симбиозы и возможность их практического использования (обзор) 21

М. В. Рубанова, О. В. Мухортова Динамика фауны кишечных гельминтов *Perca fluviatilis* (Actinopterygii: Perciformes) в условиях многолетней сукцессии экосистемы 31

СТАТЬИ

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

Е. А. Домнина, Т. А. Адамович, А. С. Тимонов, Т. Я. Ашихмина Изучение лесовосстановления на основе спутниковых снимков высокого разрешения ... 38

С. Г. Скугорева, Г. Я. Кантор, Л. И. Домрачева Оценка эффективности сорбции ионов свинца(II) с помощью моделей кинетики и изотермы сорбции ... 44

А. И. Фокина, С. Ю. Огородникова, Е. В. Веселова, Л. В. Трефилова Оптимизация условий определения токсичности водных растворов тетразольно-топографическим методом 52

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина Использование нормализованного относительного альгоиндекса для оценки «цветения» воды в водохранилищах Вятско-Камского Предуралья 60

Е. М. Лаптева, И. Г. Захожий, И. В. Далькэ, Ю. А. Смотрина, Э. А. Генрих Влияние инвазии борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на плодородие постагрогенных почв Европейского Северо-Востока 66

М. В. Носова, В. П. Середина Техногенный галогенез нефтезагрязнённых почв пойменных экосистем в условиях гумидного почвообразования и его экологические последствия 74

С. В. Дёгтева Особенности восстановления растительности на отвалах отработанных россыпей Приполярного Урала 80

Н. В. Пахарькова, А. Д. Шкарубо, Г. А. Сорокина, Н. А. Гаевский, Ю. С. Григорьев, О. П. Калякина, А. А. Шубин, М. А. Полосухина Влияние загрязнения воздуха на экофизиологические показатели сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в урбоэкосистемах Южной Сибири 90

Т. В. Носкова, М. С. Панина, О. М. Лабузова, Т. С. Папина, Е. Г. Ильина Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты в городской черте 98

Н. М. Горбач, И. Н. Кутявин, В. В. Старцев, А. А. Дымов Динамика пожаров на Северо-Востоке европейской части России в голоцене 104

В. М. Рябов, Е. В. Рябова, Т. Я. Ашихмина Оценка биоразнообразия как механизм изменения статуса особо охраняемых природных территорий 111

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Е. Г. Винокуров, Х. А. Невмятуллина, Т. В. Гусева, И. С. Курошев Ресурсная и экологическая эффективность гальванического производства: вопросы водопотребления 118

В. А. Кузьмин, И. А. Заграй, И. А. Десятков Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения 126

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

И. А. Кириллова, Д. В. Кириллов Семенная продуктивность и особенности биологии *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) на северной границе ареала 133

Т. А. Трифонова, А. А. Марцев, О. Г. Селиванов, О. В. Савельев Опыт пересадки популяции краснокнижного вида растения в условиях начала реконструкционных работ в охранной зоне нефтепровода 140

Sh. R. Abdullin The influence of some factors on cyanobacteria and algae biodiversity in karst speleogenesis 147

Л. М. Абрамова, Р. А. Билалова, Р. В. Вафин, З. Х. Шигапов Влияние метеоусловий и видовых особенностей на прохождение фенодат клематисов в Башкирском Предуралье 153

А. Г. Татаринов, О. И. Кулакова Значение особо охраняемых природных территорий в сохранении видового разнообразия булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Papilionidea) Республики Коми 160

АГРОЭКОЛОГИЯ

R. M. Khairullin, R. Sh. Irgalina, N. A. Urazbakhtina, I. V. Maksimov New environmentally friendly microbiological composition for comprehensive protection of wheat from diseases and pests 168

Ю. В. Батаева, Л. Н. Григорян, Е. А. Курашов, Ю. В. Крылова, Е. В. Федорова, Е. Я. Явид, В. В. Ходонович, Л. В. Яковлева Изучение метаболитов *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений 172

Т. П. Градобоева Поражённость семян гороха (*Pisum sativum* L.) патогенными микроорганизмами 179

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

Е. С. Стравинскене, Ю. С. Григорьев , Т. Л. Шашкова, М. А. Субботин, М. А. Полосухин Влияние состава питательной среды на чувствительность водоросли *Dunaliella tertiolecta* к бихромату калия 186

Г. А. Даллакян, В. И. Ипатова, И. В. Михеев, А. М. Лазарева, С. И. Погосян Влияние фуллеренов C_{60} и C_{70} на развитие и фотосинтез культуры водоросли *Scenedesmus quadricauda* 193

M. K. Mladenov, S. A. Yaneva, N. G. Rangelova Studies of the toxic effect of heavy metals contained in contaminated soil on the germination and growth of higher plants ... 198

М. А. Азямов, А. А. Широких Изучение антитоксических и антиоксидантных свойств полисахаридов гриба *Hericium erinaceus* и диальдерона на модели оксидативного стресса, вызванного хлоркарбоном у белых мышей 205

СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

О. Н. Соломина, М. И. Сергушкина, А. А. Широких, Т. В. Полежаева, И. Г. Широких, О. О. Зайцева, А. Н. Худяков *Hericium erinaceus* BP16 как источник полисахаридов, стабилизирующих функции сперматозоидов быков при гипотермическом хранении 212

Е. М. Гордеева, В. Н. Пугач Парижское соглашение и «климатическая нейтральность»: роль сектора «Землепользование» 219

В. А. Лиханов, О. П. Лопатин Биотопливо или дымящие автомобили? 228

А. Н. Королев Некоторые аспекты проблемы проникновения волка (*Canis lupus* L.) в населённые пункты Республики Коми 237

ИНФОРМАЦИЯ

К юбилею А. А. Широких 244

CONTENTS

REVIEWS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

A. I. Ivanov Environmental aspects of the development of mushroom production in Russia 6

T. Yu. Korshunova, E. V. Kuzina, D. A. Sharipov, G. F. Rafikova Bacteria of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* in the processes of bioremediation of oil-contaminated objects (review) 13

L. I. Domracheva, A. L. Kovina, L. V. Kondakova, T. Ya. Ashikhmina Cyanobacterial symbioses and their practical use (review) 21

M. V. Rubanova, O. V. Mukhortova Dynamics of intestinal helminth fauna *Perca fluviatilis* (Actinopterygii: Perciformes) in conditions of long-term ecosystem succession 31

ARTICLES

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

E. A. Domnina, T. A. Adamovich, A. S. Timonov, T. Ya. Ashikhmina Reforestation study based on high resolution satellite imagery 38

S. G. Skugoreva, G. Ya. Kantor, L. I. Domracheva Evaluation of the sorption efficiency of lead(II) ions using models of kinetics and sorption isotherm 44

A. I. Fokina, S. Yu. Ogorodnikova, E. V. Veselova, L. V. Trefilova Tetrasol-topographic method for determining toxicity of aqueous solutions: conditions and approaches to realization 52

MONITORING OF ANTHROPOGENICALLY DISTURBED AREAS

T. I. Kutyavina, V. V. Rutman, T. Ya. Ashikhmina The use of the normalized relative algo-index for the assessment of algae blooms in the reservoirs of the Vyatka-Kama cis-Urals 60

E. M. Lapteva, I. G. Zakhozhiy, I. V. Dalke, Y. A. Smotrina, E. A. Genrikh Influence of *Heracleum sosnowskyi* Manden. invasion on postagrogenic soil fertility in European North-East 66

M. V. Nosova, V. P. Seredina Technogenic halogenesis of oil-contaminated soils of floodplain ecosystems under conditions of humid soil formation and its environmental consequences 74

S. V. Degteva Features of vegetation restoration on the dumps of spent minings of the Subpolar Urals 80
N. V. Pakharkova, A. D. Shkaruba, G. A. Sorokina, N. A. Gaevskiy, Yu. S. Grigoriev, O. P. Kalyakina, A. A. Shubin, M. A. Polosukhina Influence of air pollution on the ecophysiological parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in the urban ecosystems of Southern Siberia 90
T. V. Noskova, M. S. Panina, O. M. Labuzova, T. S. Papina, E. G. Ilina Evaluation of anthropogenic load on water bodies within the city limits 98
N. M. Gorbach, I. N. Kutyavin, V. V. Startsev, A. A. Dymov Dynamics of fires in the northeast of the European part of Russia in the Holocene 104
V. M. Ryabov, E. V. Ryabova, T. Ya. Ashikhmina Assessment of biodiversity as a mechanism for changing the status of specially protected natural areas 111

ECOLOGIZATION OF PRODUCTION

E. G. Vinokurov, Kh. A. Nevmyatullina, T. V. Guseva, I. S. Kuroshev Resource efficiency and environmental performance of electroplating processes: water consumption aspects 118
V. A. Kuzmin, I. A. Zagrai, I. A. Desiatkov Monitoring the formation of nitrogen oxides in the furnace of a steam boiler for protection of atmospheric air from pollution 126

POPULATION ECOLOGY

I. A. Kirillova, D. V. Kirillov Семенная продуктивность и особенности биологии *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) на северной границе ареала 133
T. A. Trifonova, A. A. Martsev, O. G. Selivanov, O. V. Saveliev Experience of transplanting a population of a red book plant species in the conditions of the beginning of reconstruction works in the protected area of the oil pipeline 140
Sh. R. Abdullin The influence of some factors on cyanobacteria and algae biodiversity in karst speleogenesis 147
L. M. Abramova, R. A. Bilalova, R. V. Vafin, Z. Kh. Shigapov The influence of weather conditions and species characteristics on the passage of phenodates of clematis in the Bashkir Cis-Urals 153
A. G. Tatarinov, O. I. Kulakova The role of protected areas in the conservation of species diversity of butterflies (Lepidoptera, Papilionidea) in the Komi Republic ...160

AGROECOLOGY

R. M. Khairullin, R. Sh. Irgalina, N. A. Urazbakhtina, I. V. Maksimov New environmentally friendly microbiological composition for comprehensive protection of wheat from diseases and pests 168
Yu. V. Bataeva, L. N. Grigoryan, E. A. Kurashov, J. V. Krylova, E. V. Fedorova, E. J. Iavid, V. V. Khodonovich, L. V. Yakovleva Study of metabolites of *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 for the creation of environmentally friendly plant protection products 172
T. P. Gradoboeva Infestation of pea seeds (*Pisum sativum* L.) with pathogenic microorganisms 179

ECOTOXICOLOGY

E. S. Stravinskene, Yu. S. Grigor'ev, T. L. Shashkova, M. A. Subbotin, M. A. Polosukhina Effect of the cultivation medium composition on *Dunaliella tertiolecta* sensitivity to potassium dichromate 186
G. A. Dallakyan, V. I. Ipatova, I. V. Mikheev, A. M. Lazareva, S. I. Poghosyan The effect of fullerenes C_{60} and C_{70} on the growth and photosynthesis of the algae culture *Scenedesmus quadricauda* 193
M. K. Mladenov, S. A. Yaneva, N. G. Rangelova Studies of the toxic effect of heavy metals contained in contaminated soil on the germination and growth of higher plants 198
M. A. Aziamov, A. A. Shirokikh The study of the mushroom *Hericium erinaceus* polysaccharides and dialderon antitoxic and antioxidant properties on the oxidative stress model in mice caused by carbon tetrachloride 205

SOCIAL ECOLOGY

O. N. Solomina, M. I. Sergushkina, A. A. Shirokikh, T. V. Polezhaeva, I. G. Shirokikh, O. O. Zaitseva, A. N. Khudyakov *Hericium erinaceus* BP16 as a source of polysaccharides stabilizing the functions of bulls spermatozoa during hypothermic storage 212
Y. M. Gordeeva, V. N. Pugach The Paris Agreement and "Climate neutrality": the role for "Agriculture, forestry and other land use" sector 219
V. A. Likhanov, O. P. Lopatin Biofuels or smoking cars? 228
A. N. Korolev Some aspects of the problem of the wolf's (*Canis lupus* L.) penetration in the settlements of the Komi Republic 237

INFORMATION

For the anniversary of A. A. Shirokikh 244

УДК 504.054

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-006-012

Экологические аспекты развития грибоводства в России

© 2021. А. И. Иванов, д. б. н., профессор,
Пензенский государственный аграрный университет,
440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30,
e-mail: rcgekim@mail.ru

Искусственно выращенные съедобные грибы, благодаря уникальному химическому составу, представляют собой важный элемент здорового питания, и потому их производство быстро растёт. Вместе с тем, грибоводство оказывает негативное влияние на окружающую среду. Его оценка затруднена тем, что, как в научной литературе, так и в нормативных документах, действующих в России, данная проблема отражена недостаточно полно. Наибольшее негативное воздействие на атмосферный воздух оказывают предприятия, специализирующиеся на производстве шампиньона. Это определяется особенностями технологии выращивания данного гриба и большими объёмами его производства. В процессе приготовления субстратов для выращивания шампиньона выделяются аммиак, сероводород, диоксид азота, монооксид углерода и метан. Предприятия, специализирующиеся на выращивании вешенки, более экологичны. Их воздействие на окружающую среду сводится в основном к выделению углекислого газа в процессе роста мицелия и развития плодовых тел. На грибоводческих предприятиях образуются также сточные воды и твёрдые отходы, а также отработанный субстрат после выращивания грибов. Он может быть использован без доработки в качестве органического удобрения, благотворно влияющего на агромелиоративные свойства почвы и повышающего в ней содержание гумуса. Поэтому его следует считать не отходом, а побочным продуктом производства. Отработанный субстрат после выращивания грибов может также применяться для производства биогумуса. В этом процессе используются дождевые черви. Таким образом, грибоводческие комплексы могут решать проблему восстановления плодородия почв.

Ключевые слова: грибоводство, отработанный субстрат, загрязнение среды, компостирование, куриный помёт, органические удобрения.

Environmental aspects of the development of mushroom production in Russia

© 2021. A. I. Ivanov ORCID: 0000-0002-3344-9969,
Penza State Agrarian University,
30, Botanicheskaya St., Penza, Russia, 440014,
e-mail: rcgekim@mail.ru

Artificially grown edible mushrooms, due to their unique chemical composition, are an important element of a healthy diet and therefore their production is growing rapidly. At the same time, mushroom growing has a negative impact on the environment. Its assessment is complicated by the fact that both in the scientific literature and in the regulatory documents in force in Russia, this problem is not fully represented. Enterprises specializing in the production of champignon have the greatest negative impact on the atmospheric air. This is determined by the peculiarities of the cultivation technology of this mushroom and the large volumes of its production. In the process of preparing substrates for growing mushrooms, ammonia, hydrogen sulfide, nitrogen dioxide, carbon monoxide and methane are released. Enterprises specializing in the cultivation of oyster mushrooms are more environmentally friendly. Their impact on the environment is mainly reduced to the release of carbon dioxide during the growth of the mycelium and the development of fruit bodies. Mushroom enterprises also generate waste water and solid waste, as well as waste substrate after growing mushrooms. It can be used without modification as an organic fertilizer, which has a beneficial effect on the agromeliorative properties of the soil and increases the humus content in it. Therefore, it should not be considered a waste, but a by-product of production. Waste substrate after growing mushrooms can also be used for the production of vermicompost. In this process, earthworms are used. Thus, mushroom growing complexes can solve the problem of restoring soil fertility.

Keywords: agrocoenosis, mushroom growing, pollution, composting, chicken manure, organic fertilizers, waste substrate.

Грибоводство – активно развивающаяся отрасль сельскохозяйственного производства. До введения экономических санкций против России более 80% грибного рынка нашей страны обеспечивалось за счёт импортной продукции [1, 2]. В настоящее время в связи с реализацией программ импортозамещения в различных регионах России: Ленинградской, Московской, Самарской, Пензенской областях, в Краснодарском крае и Республике Татарстан уже работают и строятся новые предприятия, специализирующиеся на выращивании съедобных грибов. Благодаря их запуску свежих отечественных грибов на Российском рынке в 2018 г. стало в два раза больше, чем импортных. Российская грибная индустрия стремительно растёт [3]. Таким образом, грибоводство в нашей стране становится крупной отраслью сельского хозяйства, которая, с одной стороны, оказывает негативное влияние на окружающую среду, с другой стороны решает ряд серьёзных экологических проблем. Однако, как в научной литературе, так и в нормативных документах, действующих в России, данная проблема отражена крайне недостаточно. Имеющиеся сведения разрознены и не систематизированы, что создаёт большие трудности в практической работе, связанной с проектированием грибоводческих комплексов и организацией на них производственного контроля и природоохранных мероприятий.

В связи с этим целью данного обзора был анализ имеющейся информации, отражающей экологические аспекты развития грибоводства в России.

Плодовые тела искусственно выращенных съедобных грибов как элемент здорового питания

Съедобные грибы приобретают всё большее и большее значение в питании человека. Это определяется особенностями их химического состава. В отличие от продуктов растительного происхождения, в первую очередь, зерновых и крупяных культур, они почти не содержат сахаров и крахмала [4, 5]. По содержанию белков и аминокислот грибы приближаются к мясу и рыбе, однако в отличие от последних они не имеют в своём составе непредельных жирных кислот и холестерина [6–8]. Кроме того, они богаты витаминами группы B, D и PP, микроэлементами [8, 9]. Всё это в сочетании с низкой калорийностью делает их незаменимым компонентом диет для людей, страдающих болезнями «цивилизации» – ожирением, диабетом, нарушениями сердечно-сосудистой системы и онкологией. Большинство культивируемых съедобных грибов представляют собой не только важнейший компонент диетического питания, но и эффективное профилактическое средство от названных выше заболеваний [10, 11]. Например, шампиньон двуспоровый (*Agaricus bisporus* (J.E. Lange) Imbach) обладает противоопухолевыми свойствами, а также антибактериальной и антивирусной активностью. Он является иммуномодулятором, эффективен при диабете, снижает уровень холестерина в крови, способствует выведению тяжёлых металлов из организма. У дереворазрушающих грибов – вешенки устричной (*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm.) и особенно у шиитаке эти свойства выражены значительно сильнее. В последние годы большую популярность приобретает культура гериция гребенчатого (*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.), который перспективен в плане лечения и профилактики болезни Альцгеймера и старческого слабоумия [10, 11]. Большинство видов дикорастущих съедобных грибов, широко заготавливаемых населением, этими свойствами не обладают. Кроме того, искусственно выращенные грибы, в отличие от дикорастущих, безопасны с точки зрения накопления в их плодовых телах тяжёлых металлов и радионуклидов. Это обеспечивается обязательным контролем исходных компонентов субстратов для их выращивания и партий грибов, поставляемых в торговую сеть [12, 13].

Негативное воздействие грибоводческих комплексов на окружающую среду

В структуре производства и потребления грибной продукции в России на первом месте находится шампиньон. В настоящее время его выращиванием в нашей стране занимается 38 предприятий. Наиболее крупные из них располагаются в Центральном федеральном округе. При этом объёмы производства этого гриба стремительно растут. Особенно резкий подъём в шампиньноводстве был в 2017 г., когда производство этого гриба, по сравнению с 2016 г., выросло на 66%. В 2017 г. в Российской Федерации (РФ) было поставлено в торговую сеть 23730 т шампиньонов. На производстве вешенки в РФ специализируется 69 предприятий, наиболее крупные из которых находятся в Южном федеральном округе. Однако по размерам и объёмам про-

изводства эти предприятия существенно уступают шампиньонным комплексам. В 2017 г. в России было произведено 6150 т вешенки. Это почти в четыре раза меньше, чем шампиньонов. Культивирование шиитаке, намеко и других экзотических видов грибов базируется в основном на предприятиях, производящих вешенку. В 2018 г. их производство в нашей стране составило всего 103 т [3].

Наибольшее негативное воздействие на атмосферный воздух оказывают предприятия, специализирующиеся на производстве шампиньона. Это определяется особенностями технологии выращивания данного гриба и большими объёмами его производства. В руководствах по данной тематике, изданных на русском языке, этот вопрос вообще не рассматривается [14, 15] или рассматривается очень кратко [16–18]. Единственным источником, в котором приводятся качественные и количественные характеристики газообразных выбросов, является такой документ, как «Нормы технологического проектирования комплексов по выращиванию шампиньонов» [19]. В нём приводятся примерные цифры, характеризующие количество и состав газообразных выбросов цехов по производству субстрата фазы 1. Это звено технологического цикла выращивания шампиньона заключается в ферментации смеси куриного помёта и соломы с участием комплекса термофильных микроорганизмов, в процессе жизнедеятельности которых в окружающую среду происходит выброс газов. При компостировании 1000 т этого материала, необходимого для 1 га площади выращивания, в атмосферный воздух выделяются: аммиак – 6640 г/ч; сероводород – 54 г/ч; диоксид азота – 54 г/ч; монооксид углерода – 940 г/ч. В процессе приготовления субстрата фазы 1 в воздух может попадать метан, количество которого зависит от аэрации субстрата. Чем больше в его массе будет анаэробных зон, тем, соответственно, в большем количестве он будет выделяться [20]. Однако проблема количественной оценки выбросов этого парникового газа в процессе приготовления компоста остаётся практически не изученной.

Следующим этапом технологии приготовления субстрата является его термическая обработка в специальных закрытых помещениях – тоннелях, в результате которой из субстрата фазы 1 получается субстрат фазы 2. Выделение аммиака в ходе этого процесса составляет 2,5 г/ч, углекислого газа – 300 г/ч на 1 т субстрата. При приготовлении субстрата фазы 3, которое заключается в проращивании мицелия в субстрате фазы 2, из перечисленных выше поллютантов выделяется только углекислый газ в количестве около 60 г/ч на 1 т субстрата, который, хотя и не токсичен и не имеет неприятного запаха, но является опасным парниковым газом [19].

Таким образом, производство субстрата для выращивания шампиньонов оказывает негативное влияние на атмосферный воздух, что в итоге может привести к конфликтам интересов между предприятием и проживающим рядом населением. Указания на это имеются в работе [21]. Однако рекомендации по расчётам размеров санитарно-защитных зон в ней отсутствуют. В основном нормативном документе «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» цеха по производству субстрата даже не упоминаются [22]. Разработчики же конкретных проектов предприятий по выращиванию шампиньонов относят их к категории объектов и производств агропромышленного комплекса и малого предпринимательства класса I. Основанием для этого является то, что на их территориях имеются «открытые хранилища навоза и помёта», для которых указанным выше документом устанавливается санитарно-защитная зона в 1000 м.

Негативное воздействие предприятий, специализирующихся на выращивании вешенки, сводится в основном к выделению углекислого газа в процессе роста мицелия и развития плодовых тел. Мицелий грибов из подаваемого приточной вентиляцией воздуха активно поглощает кислород и выделяет основной парниковый газ – диоксид углерода. В ходе экспериментальных исследований нами было установлено, что потеря массы субстрата от момента инокуляции до съёма грибов первой волны плодоношения составляет 54%. Из них примерно 30% теряется на испарение, 40% выносится с урожаем плодовых тел, а 30% расходуется на дыхание, в ходе которого происходит полное окисление глюкозы, образовавшейся в результате расщепления клетчатки ферментами гриба. Как показали наши расчёты, 1 т субстрата за производственный цикл выделяет в атмосферу порядка 52,5 кг углекислого газа. Полученная величина сопоставима с данными, приведёнными в работе [20], по количественной оценке выделения этого вещества при микогенном разложении древесины в природных условиях.

В связи с тем, что приготовление субстрата и выращивание грибов требуют поддержания

определённых микроклиматических параметров, возникает проблема отопления помещений. Поэтому обязательной частью грибоводческих комплексов являются котельные. Объём выбросов вредных веществ в атмосферу: SO_2, CO, NO_2 и сажи при сжигании различных видов топлива может быть достаточно большим. Максимальные показатели он имеет при работе на каменном угле, средние – на мазуте, минимальные – на природном газе. Однако какой-либо специфики в эксплуатации котельных на грибоводческих предприятиях не существует. Расчёт выбросов поллютантов в атмосферу производится по общепринятым методикам [23].

Грибоводческие предприятия потребляют достаточно большое количество воды. На производство 1 т субстрата расходуется порядка 11 $м^3$ воды [16]. Однако в связи с тем, что образующаяся при увлажнении исходных материалов и их смеси вода используется повторно, без очистки, во избежание потери питательных веществ, какая-либо специфика в химическом составе сбросов отсутствует. Поэтому расчёт объёма сточных вод (СВ) также осуществляется с помощью общепринятых для промышленных предприятий методик. Основной объём СВ, содержащих моющие средства и вещества, применяемые для дезинфекции, образуется в результате ежедневных влажных уборок, мытья оборудования и тары, а также дезинфекции культивационных помещений и технологических коридоров. Кроме того, достаточно большой объём стоков даёт бытовая канализация, так как крупные грибоводческие предприятия предполагают высокую численность работающих. Поэтому на предприятии возникает необходимость создания системы, выводящей стоки на существующие очистные сооружения. Если такая возможность отсутствует, на объекте создаётся собственная система очистки СВ [24].

На грибоводческих комплексах образуется ряд твёрдых отходов. Специфичными для них являются осадок от увлажняемой соломы, накапливающийся в резервуарах для её замачивания, и обрезки ножек, образующиеся при сборе, а также бракованные грибы, поражённые плесневыми грибами и бактериями. На крупных предприятиях объём этих отходов может быть достаточно большим. По массе он составляет примерно 10% от массы выращенных грибов [17, 18]. Этот отход следует вывозить специальным автотранспортом в места, согласованные с органами санитарно-ветеринарного надзора. К неспецифичным отходам следует отнести бытовой мусор, полиэтиленовую упаковку от посевного мицелия и непригодную для использования тару. Эти отходы не образуются в большом количестве и вывозятся на свалки в существующем порядке [19].

Перспективы использования отработанных грибных субстратов в качестве органических удобрений и питательных грунтов

Предприятие с площадью выращивания шампиньонов в 1 га ежегодно даёт порядка 10 тыс. т отработанного субстрата. Поэтому проблема его вывоза с территории предприятия и рациональное использование имеет большое практическое значение. Однако в нормативной документации этот вопрос практически не рассматривается. В научной литературе сведения по данной проблеме также ограничены и противоречивы. Так, в работе [16] отработанный субстрат рассматривается как отход, подлежащий вывозу на свалки. Автор работы [25], напротив, характеризует его как полезный продукт, представляющий собой ценное органическое удобрение. Этой же точки зрения придерживается и автор данного обзора [26, 27].

Отработанный субстрат после выращивания шампиньонов не включён в «Федеральный классификационный каталог отходов», поэтому он и не может рассматриваться как отход [28]. Это комковатый органический материал тёмно-коричневого цвета, содержащий примесь сильно перепревшей, легко растираемой в порошок соломы. Исходными компонентами для его получения являются куриный помёт и пшеничная солома в соотношении 1 : 1. Кроме того, он включает в себя смесь низинного и верхового торфа – около 10%, известковые добавки до 1% и строительный гипс до 1%. Содержание вредных компонентов, таких, как тяжёлые металлы и радионуклиды, в нём исключается, так как исходные материалы для его приготовления проходят обязательный экологический контроль. Кроме вредных химических компонентов, в курином помёте, используемом для получения рассматриваемого продукта, не должно содержаться патогенных микроорганизмов, жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, личинок и куколок синантропных мух. Контроль куриного помёта, используемого в качестве сырья для производства компоста по этим показателям, гарантирует их отсут-

ствие и в рассматриваемом продукте. Кроме того, пастеризация исходных материалов в процессе приготовления и термическая обработка компоста, перед выгрузкой из шампиньонницы, также гарантирует отсутствие в нём указанных выше объектов [16, 17].

Как показывает сравнение химического состава отработанного субстрата с химическим составом компостов, производимых на основе птичьего помёта и соломы, реализуемых в настоящее время в оптовой и розничной торговле, они оказываются очень близкими [29]. Поэтому отработанный субстрат следует определять, как побочный продукт производства, который может быть использован непосредственно в качестве органического удобрения или питательного грунта, без обезвреживания и доработки, так как его характеристики и по полезным, и по вредным компонентам соответствуют ГОСТ Р 53381-2009 [30]. Отработанный субстрат, согласно Общероссийскому классификатору продукции по видам экономической деятельности (дата введения 01.02.2014), может быть определён как «Удобрения животного или растительного происхождения, не включённые в другие группировки» ОКПД-2, код 20.15.80 [31].

Таким образом, отработанный субстрат представляет собой ферментированную смесь из куриного помёта и соломы. Проблема применения подобных материалов в качестве органического удобрения изучена достаточно хорошо [32, 33]. Ферментированный куриный помёт улучшает агрономические свойства почвы: в 2–3 раза усиливает активность прикорневой микрофлоры, повышает содержание гумуса и водопроницаемость. Следствием этого является повышение урожайности сельскохозяйственных культур [34–36].

В субстрате после выращивания шампиньонов содержание основных элементов питания оказывается ниже, чем в органическом удобрении, приготовленном из ферментированного куриного помёта, так как значительная часть азота теряется в процессе ферментации в виде аммиака и используется культурой шампиньона. С урожаем грибов также выносится до 50% фосфора и калия, содержавшихся в исходных компонентах. В то же время в отработанном субстрате содержание основных элементов минерального питания оказывается более высоким, чем в полуперепревшем навозе домашних животных, используемом в качестве органического удобрения [32]. Поэтому примерные дозы внесения отработанного субстрата под зерновые культуры будут в 2–2,5 раза выше нормы внесения ферментированного куриного помёта, но в 1,5–2 раза ниже, чем рекомендуемые нормы внесения навоза [33]. Они будут находиться в интервале от 10 до 20 т/га на чернозёмах и от 20 до 40 т/га на дерново-подзолистых и серых лесных почвах. Приводимые цифры имеют ориентировочный характер, так как в каждом конкретном случае необходимо учитывать культуру, под которую вносится удобрение, и содержание элементов минерального питания в почве. Чем оно меньше, тем соответственно эффективная доза внесения будет выше.

Проблема утилизации отработанного субстрата после выращивания вешенки не находит отражения в нормативных документах [37]. Имеющаяся информация содержится лишь в немногочисленных публикациях и патентах [38–42]. Отработанный субстрат после выращивания вешенки представляет собой полуперепревшую, частично разрушенную ферментами гриба пшеничную солому. По содержанию основных элементов минерального питания она существенно уступает шампиньонному компосту, поэтому вносить её в почву следует в сочетании с минеральными удобрениями. Исследования влияния этого материала на почву и урожайность сельскохозяйственных культур проводились в Пензенском государственном аграрном университете. В результате полевых опытов было установлено, что оптимальная доза внесения отработанного субстрата после выращивания вешенки составляет 20 т/га, что по содержанию углерода соответствует 20 т навоза. Урожайность зерновых культур в первый год внесения рассматриваемого материала увеличивается на 12–14%, на второй год – на 10–12%. Эта доза оказывает положительное влияние на агромелиоративные свойства почвы. В ходе трёхгодичных опытов было показано, что в результате внесения отработанного субстрата содержание гумуса в почве повышается на 0,11% [38]. Последнее особенно важно, так как широкое внедрение современных технологий выращивания сельскохозяйственных культур с применением высоких доз минеральных удобрений создаёт проблему – снижение естественного плодородия почв [43, 44]. Использование же отработанного субстрата после выращивания грибов в качестве органического удобрения будет в определённой степени способствовать её решению. Как показал анализ опыта производственного комплекса «Каскад» в г. Миллерово

Ростовской области – крупнейшего производителя вешенки в России, отработанный субстрат после выращивания этого гриба может использоваться для производства биогумуса с использованием дождевых червей. Как сам биогумус, так и различные продукты, созданные на его основе, находят самое широкое применение в качестве землеудобрительных препаратов и стимуляторов роста [42].

Заключение

Грибоводческие предприятия дают значительные объёмы выбросов вредных газов, сбросов сточных вод и твёрдых отходов. Их негативное влияние на окружающую среду быстро растёт. Это связано с активным развитием грибоводства в настоящее время, которое определяется востребованностью производимой им продукции как важнейшего компонента здорового питания.

На предприятиях, специализирующихся на производстве шампиньона и вешенки, в большом количестве образуется побочный продукт производства – отработанный субстрат. В связи с тем, что этот материал по своим физико-химическим свойствам близок к органическим удобрениям, производимым путём компостирования помёта и навоза, его можно без доработки вносить в почву, а также использовать для производства биогумуса. Однако это никак не отражено в действующих в настоящее время нормах технологического проектирования комплексов по выращиванию шампиньона и вешенки [19, 37]. Учитывая важность данной проблемы, возникает необходимость её описания в новых редакциях этих документов.

References

1. Ivanov A.I. Mushroom growing. Penza: RIO PGSKHA, 2015. 96 p. (in Russian).

2. Hrenov A.V. Mushroom market of Russia 2014: Prices have increased, demand has not decreased // Shkola gribovodstva. 2015. No. 2. P. 25–28 (in Russian).

3. Hrenov A.V. Russian mushroom industry in the phase of rapid growth // Shkola gribovodstva. 2018. No. 2. P. 26–27 (in Russian).

4. Reis F.S., Barros L., Martins A., Ferrerira I.C.F.R. Chemical composition and nutrition value of the most videlyappricated cultivated muchrooms: An inter species comparative study // Food Chem. Toxicol. 2012. V. 50. P. 191–197. doi: 10.1016/j.fct.2011/10/056

5. Matilla P., Salo-Vaanen P., Konko K., Aro H., Yalava T. Basic composition and aminoacid contents of muchrooms cultivated in Finland // J. Agric. Food Chem. 2002. V. 50. P. 6419–6422. doi: 10/1021/jf02608m

6. Bernas E., Jaworska G. Comparison of aminoacid content in frosen *P. ostreatus* and *A. bisporus* muchrooms // Acta Sci. Pol., Technol. Aliment. 2010. V. 9. No. 3. P. 295–303.

7. Siwulski M., Socol S., Soberalski K., Regula J., Walkowiak-Tomczak D., Sas-Golak I., Szczepka M., Sztoch R., Czaterma J., Gnus R. Champignon *Agaricus*. Species, cultivation, properties. Hjznan: Wydawnictwo uniwersitetu przyrodniczego w Poznaniu, 2014. 186 p. (in Poland).

8. Matilla P., Konko K. Contents of vitamins, mineral elements and some phenolic compounds in cultivated muchrooms // Nutrition. 2002. No. 16. P. 7–9. doi: 10.4236/fns.2014.513128

9. Yuj L., Tuliguel T., Hajin B., Shirokih A.A., Shirokih I.G., Kirillov D.V. Medicinal mushrooms in traditional Chinese medicine and biotechnology. Kirov: O-Kratkoe, 2009. 320 p. (in Russian).

10. Smiderle F.R., Ruthes A.C., Van Arkel J., Chanput W., Iacomini M., Wichers H.J., Grienshon L.J. Polysaccharides from *Agaricus bisporus* and *Agaricus brasiliensis* show similarities in their structures and immunomodulatory effects on human monocytic THP-1 cells // BMC Complem. Altern. Med. 2011. No. 11. P. 32–58. doi: 10/1186/1472-6882-11-58

11. Vishnevskiy M.V. Medicinal mushrooms of Russia. Moskva: Prospekt, 2018. 704 p. (in Russian).

12. Ivanov A.I., Gorokhova A.G., Andreyeva M.A., Duryagina K.A. Biological accumulation of chemical elements by agaricomycetes mushrooms under conditions of Volga highlands // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 39–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-039-044

13. Sanitary rules for the harvesting, processing and sale of mushrooms. Moskva: Federalnyy tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2010. 34 p. (in Russian).

14. Shalashova N.B., Bubnova O.N. Champignons. Moskva: Rossel'hozizdat, 1987. 32 p. (in Russian).

15. Devochkin L.A. Champignons. Moskva: Rossel'hozizdat, 1989. 175 p. (in Russian).

16. Rancheva C. Intensive production of champignons. Moskva: Agropromizdat, 1990. 220 p. (in Russian).

17. Ivanov A.I. Champignons of Russia (genus *Agaricus* L.). Species composition, ecology, cultivation. Penza: RIO PGAU, 2018. 200 p. (in Russian).

18. Mihajlova L.I. The stems of mushrooms is a dangerous waste // Shkola gribovodstva. 2018. No. 6. P. 24–25 (in Russian).

19. Standards of technological design, complexes for the cultivation of champignons. NTP-APK 1.10.09.002-04. Moskva: VNIIO, 2004. 33 p. (in Russian).

20. Muhin V.A., Voronin P.Yu., Ladatko V.A. The size of stream of C-CO_2 and H_2O during decomposition of wood mortmass by tinder mushrooms // Vest. Mosk. University. Ser. 16. Biological. 2006. No. 4. P. 43–45 (in Russian).

21. Safray A.I., Karpov F.F. Principles of compost production organization // Shkola gribovodstva. 2003. No. 3. P. 21–31 (in Russian).

22. "Sanitary protection zones and sanitary classification of enterprises, structures and other objects" SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 [Internet resource] Base.garant.ru. (Accessed. 04.03.2019) (in Russian).

23. Guidance manual for calculating, regulation and control of emissions of pollutants into the air. Sankt-Peterburg: NII Atmosfera, 2005. 189 p. (in Russian).

24. Ivanov A.I. Mushroom growing: textbook. Penza: RIO PGAU, 2019. 205 p. (in Russian).

25. Mardzhori G. Spent mushroom substrate – waste or income? // Shkola gribovodstva. 2003. No. 3. P. 19–20 (in Russian).

26. Ivanov A.I., Ryazantsev M.S. The impact of oyster mushroom growing enterprises on the environment // Education, science, practice: innovative aspect: Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu A.F. Blinokhvatova. Penza: RIO PGAU, 2018. P. 199–203 (in Russian).

27. Ivanov A.I., Ryazantsev M.S. Ways of utilization of the spent substrate after cultivation of mushrooms // Education, science, practice: innovative aspect: Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu A.F. Blinokhvatova. Penza: RIO PGAU, 2018. P. 203–205 (in Russian).

28. The Federal classification catalog of waste. Order of Rosprirodnadzor dated 05.22.2017 No. 242 (with amendments of November 2, 2018 No. 451) [Internet resource] Ekologicheskoe-Proektirovanie.ru (Accessed: 11.03.2019) (in Russian).

29 Chekaev N.P. Agri-environmental assessment of the use of chicken manure as fertilizer // Plodorodie. 2009. No. 2. P. 13–15 (in Russian).

30. GOST R 53381-2009. Soils and grounds. Nutritious soil. Technical conditions. [Internet resource] Docs.cntd.ru (Accessed: 13.03.2019) (in Russian).

31. OKPD-2, kod 20.15.80. Fertilizers of animal or vegetable origin, not included in other groups [Internet resource] gov-zakupki.ru (Accessed: 01.03.2019) (in Russian).

32. Zhezhel N.G., Panteleeva E.I. Agrokhimiya. Leningrad: Kolos, 1988. 263 p. (in Russian).

33. Artyushin A.M., Derzhavin L.M. Quick reference to fertilizers. Moskva: Kolos, 1984. 208 p. (in Russian).

34. Chekaev N.P., Aref'ev A.N., Bolgurushin A.I. The use of poultry manure for fertilizer // Chelovek i Vselennaya. 2004. No. 9. P. 94–95 (in Russian).

35. Chekaev N.P., Kuznetsov F.Yu., Vlasova T.A., Yanaeva L.T. Poultry waste as fertilizer: the environmentally safe and effective // XXI vek: Itogi proshlogo i problem nastoyashchego plus. Penza, 2015. No. 5. P. 130–140 (in Russian).

36. Chekaev N.P. Effective utilization of poultry manure as fertilizers // Regional problems of small agribusiness development: sbornik statey II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Penza: RIO PGSKHA, 2014. P. 105–110 (in Russian).

37. Norms of technological design of complexes on cultivation of oyster mushrooms. NTP APK 1.10.09.003-04. Moskva: VNIIO, 2004. 76 p. (in Russian).

38. Ivanov P.A. Changes in the productivity of grain crops and the fertility of the gray forest soil under the influence of chemical and biological land reclamation in the forest-steppe Povolzhe: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk. Penza, 2009. 20 p. (in Russian).

39. Ivanov A.I., Grishin G.E., Il'ina G.V. Ecological and economic efficiency of using the waste of mushroom production in plant growing // Niva Povolzh'y. 2012. No. 3 (24). P. 93–98 (in Russian).

40. Ivanov A.I., Koryagin Yu.V. Possibilities of using the spent substrate after oyster mushroom cultivation as an organic fertilizer // Shkola gribovodstva. 2014. No. 3 (78). P. 53–55 (in Russian).

41. Kshnikadkin S.A., Alyonin P.G., Fomin I.V. Rationale for the production of granular environmentally friendly fertilizer from waste when growing oyster mushrooms // Niva Povolzh'ya. 2016. No. 3. P. 25–31 (in Russian).

42. Novickiy P.A., Voroncov I.A., Titov I.N. A method for recycling waste substrate blocks after growing oyster mushrooms using vermicomposting // Patent RU No. 2010134515, 27.02.2012. Date of publication: 2012.02.27. Bull. 6 (in Russian).

43. Khayraddinov A.B., Bobonorov R.S., Khushmurodov Zh.B. Preservation and increase of humus content in soils // Simvol nauki. 2017. No. 2. P. 133–134 (in Russian).

44. Sharkov I.N. The concept of humus reproduction in soils // Agrokhimiya. 2011. No. 12. P. 21–27 (in Russian).

УДК 579.6

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-013-020

Бактерии родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* в процессах биоремедиации нефтезагрязнённых объектов (обзор)

© 2021. Т. Ю. Коршунова, д. б. н., в. н. с., Е. В. Кузина, к. б. н., с. н. с., Д. А. Шарипов, м. н. с., Г. Ф. Рафикова, к. б. н., с. н. с.,
Уфимский Институт биологии
Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, д. 69,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

Загрязнение окружающей среды нефтью и продуктами её переработки приобрело глобальные масштабы. Наиболее перспективным, экономически выгодным и экологически безопасным способом решения этой проблемы является биотехнологический, в основе которого лежит использование микроорганизмов, окисляющих углеводороды. Целью обзора отечественной и зарубежной литературы является анализ роли бактерий родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* в очистке почв и водных объектов от углеводородного загрязнения. Показана их способность к деструкции нефти, нефтепродуктов и разнообразных по своей структуре углеводородов, включая полициклические ароматические в широком диапазоне температуры, pH и солёности среды. Бактерии данного вида способны продуцировать сурфактанты, которые эмульгируют углеводороды, делая последние доступными для разложения микроорганизмами. Продемонстрировано, что представители родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* входят в состав многочисленных консорциумов, применяемых для ликвидации последствий контаминации экосистем углеводородами. Приведены примеры биопрепаратов-нефтедеструкторов на основе бактерий указанных родов. Обзор свидетельствует о большом научно-практическом интересе к изучению и применению штаммов *Acinetobacter* spp. и *Ochrobactrum* spp. в экологической биотехнологии.

Ключевые слова: *Acinetobacter, Ochrobactrum,* нефть, углеводороды, биодеструкция, биосурфактанты, биоремедиация.

Bacteria of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* in the processes of bioremediation of oil-contaminated objects (review)

© 2021. T. Yu. Korshunova ORCID: 0000-0002-6186-0827, **E. V. Kuzina** ORCID: 0000-0002-6905-0108, **D. A. Sharipov** ORCID: 0000-0001-5567-2902, **G. F. Rafikova** ORCID: 0000-0001-7655-5588,
Ufa Institute of Biologyfof Ufa Federal Research Centre,
Russian Academy of Sciences,
69, Prospekt Oktyabrya, Ufa, Russia, 450054,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

Environmental pollution by oil and its products has become global. The most promising, most effective and environmentally friendly way to solve this problem is the biotechnological method. It is based on the use of microorganisms that oxidize hydrocarbons. The purpose of the review of Russian and foreign literature is to analyze the role of bacteria of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* in the purification of soil and water from hydrocarbon pollution Their ability to degrade oil, oil products and hydrocarbons of various structures, including polycyclic aromatic in a wide range of temperature, pH and salinity of the medium, has been shown. It was noted that they have the ability to synthesize biosurfactants that emulsify hydrocarbons. This makes them available for degradation by microorganisms. It has been demonstrated that representatives of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* are members of numerous consortia that are used to eliminate the consequences of ecosystem contamination with hydrocarbons. Examples of oil-destructing biological preparations based on bacteria of the indicated genera are given. The review indicates a great scientific and practical interest in the study and application of strains of *Acinetobacter* spp. and *Ochrobactrum* spp. in environmental biotechnology.

Keywords: *Acinetobacter, Ochrobactrum*, oil, hydrocarbons, biodegradation, biosurfactants, bioremediation.

Увеличение добычи и, как следствие, масштабов транспортировки, переработки и потребления нефти и её производных приводит к глобальному загрязнению всех компонентов окружающей среды (ОС). Углеводороды (УВ) отрицательно воздействуют на все звенья биологической цепочки и, в целом, деформируют структуру биоценозов [1–3]. Существующие механические, термические и физико-химические методы удаления этих поллютантов дорогостоящи, часто связаны с образованием токсичных побочных продуктов и не обеспечивают полноты очистки. В настоящее время наиболее перспективным методом для решения данной проблемы, как в экономическом, так и в экологическом плане является биотехнологический, основанный на использовании микроорганизмов (МО), отличающихся повышенной способностью к биодеградации компонентов нефти и нефтепродуктов [3–5]. Установлено большое разнообразие углеводородокисляющих МО, однако наиболее широко они распространены среди бактерий родов *Pseudomonas, Acinetobacter, Bacillus, Rhodococcus, Ochrobactrum* [6–10].

Цель обзора – анализ практического применения бактерий родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* для очистки окружающей среды от нефтяного загрязнения.

Представители обоих родов распространены повсеместно. Это свободноживущие, строго аэробные грамотрицательные, неспорообразующие гетеротрофные бактерии. В качестве источника углерода они способны использовать очень широкий круг разнообразных веществ, поэтому участвуют в биодеструкции значительного числа токсикантов, в том числе нефти и нефтепродуктов (включая полициклические ароматические УВ (ПАУ)) [11–15]. Так, штаммы *Acinetobacter haemolyticus* MJ01 и *A. johnsonii* MJ4 разрушают более 90% дизельного топлива с начальной концентрацией 20 г/л после инкубации в течение 7 сут [16], а бактерии *A. beijerinckii* 302-PWB-OH1 и ZRS разлагают его на 65–74% [17, 18].

Показано, что степень деструкции сырой нефти штаммами *Acinetobacter* sp., *A. calcoaceticus* 134 и ACKS в течение 40 сут в лабораторном опыте составляет 40–73%, а в полевых условиях – 40–60% [19]. *Acinetobacter* sp. HC8-3S разрушает фракцию насыщенных УВ сырой нефти на 94% за 5 сут, поэтому он был признан полезным для нужд природоохранной деятельности и параметры его ферментации были оптимизированы для промышленного культивирования [20, 21]. Штамм *Acinetobacter* sp. N3 при 30 °С, pH 8,0 ед., концентрации сырой нефти 2 г/л и в условиях крайне высокой солёности модельной среды (35%) разлагал 16,2% загрязнителя [22].

Многие представители р. *Acinetobacter* продуцируют поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые эмульгируют нефть и УВ, делая их доступными для МО [23–25]. Бактерии *Acinetobacter* sp. D3-2 и *A. baylyi* ZJ2 образуют биосурфактант липопептидной природы. Использование штамма D3-2 для деградации сырой нефти в жидкой среде при 30 °С в присутствии 3% NaCl привело к разложению 82% углеводородных соединений [26], а штамма ZJ2 – к уменьшению содержания тяжёлых фракций УВ в почве [27]. Штамм *A. haemolyticus* Zn01 синтезирует биоПАВ, с помощью которого степень деструкции дизельного топлива за 14 сут достигала 92% [28].

Четыре изолята *A. radioresistens* и один штамм *A. calcoaceticus* утилизируют сырую нефть, н-гексадекан, флуорен и фенантрен, а также проявляют устойчивость к меди или кадмию, поэтому могут быть использованы для биоремедиации участков, контаминированных одновременно нефтью и тяжёлыми металлами [29].

Штамм *A. baumannii* BT1A за 7 сут разлагает 83% длинноцепочечных н-алканов, содержащихся в сырой нефти [30], а *A. calcoaceticus* CA16 разрушает 82–92% алифатических УВ (C_{12}–C_{18}) за 28 сут [31]. Степень биодеструкции фракции C_{18}–C_{22} бактерией *A. halotolerans* R160T составляет 50%, а керосина, дизельного топлива и бензина – 44–46% [32]. Изолят *Acinetobacter* sp. K-6 также способен к деградации 56,4% н-алканов (C_{18}–C_{22}) и 59,2% дизельного топлива в загрязнённой почве [33]. Штамм *A. junii* VA2 утилизирует 75,8% дизельного топлива за 15 сут [34].

Как известно [5, 35], использование нефтеокисляющих консорциумов более эффективно по сравнению с отдельными видами МО, так как интродукция монокультуры не может полностью решить проблему очистки от такого сложного многокомпонентного загрязнителя как нефть. Бактериальные ассоциации из штаммов, относящихся к разным таксономическим группам и отличающихся по скорости роста, спектру потребляемых субстратов и особенностям метаболизма, имеют более широкие адаптационные и экологические возможности. Кроме того, между членами консорциума возможны синергетические взаимодействия. Например, один из них может удалять токсичные для других промежуточные продукты окис-

ления УВ или выделять метаболиты, являющиеся факторами роста для иных штаммов. Таким образом, при применении микробных ассоциаций (консорциумов), как природных, так и искусственно разработанных, биодеградация нефти происходит полнее и за меньшие сроки [36–39].

Представители р. *Acinetobacter* входят в состав многочисленных углеводородокисляющих консорциумов. Так, предложена искусственная ассоциация бактерий-нефтедеструкторов родов *Acinetobacter*, *Pseudomonas* и *Bacillus*, при использовании которой за 21 сут культивирования в жидкой среде с нефтью при 10 °С степень биодеградации поллютанта составляла 69–84%. Внесение ассоциации в почву ускоряло снижение её токсичности после загрязнения отработанным автомобильным маслом и соляркой, способствовало восстановлению микробиоценоза и травяного покрова [36]. Проведено исследование эффективности применения бактерий *P. aeruginosa*, *B. subtilis* и *A. lwoffi* для разложения сырой нефти по отдельности и в консорциуме. При температуре 22 °С после 28 сут инкубации индивидуальные культуры показали меньший рост и деградацию токсиканта (74,3–77,8%), чем состоящий из них консорциум, с помощью которого утилизировали 88,5% нефти [40].

Из штамма *A. junii* H11S-25 и представителей родов *Nitratireductor* и *Pseudomonas* создан консорциум, который за 3 сут показал высокую эффективность разложения сырой нефти (45,4%), общих алканов (C_{10}–C_{34}) (74,2%) и общих ПАУ (65,7%). Степень биодеградации таких ПАУ, как пристан и хризен, составила 84,5 и 80,5% соответственно [41]. Ассоциация, включающая штаммы *A. lwoffii* BJ10 и *A. pittii* BJ6 и МО родов *Raoultella*, *Bacillus* и *Serratia*, деградировала более 94% сырой нефти после 10 сут культивирования в жидкой среде и 65% этого токсиканта после 40 сут инкубации в почве [42].

Доказана эффективность консорциума из трёх представителей р. *Acinetobacter* для очистки почвы, загрязнённой отработанным моторным маслом (15–20 г/кг почвы). Его деструкция за 2 месяца составила 48,4%, а падение коэффициента гумификации замедлялось на 20% или полностью прекращалось, что свидетельствует о положительной направленности гумусообразования и повышении плодородия почвы [43].

Создана бактериальная ассоциация «ВиО» для биоремедиации нефтезагрязнённых почвенных и водных экосистем, состоящая из штаммов-деструкторов родов *Rhodococcus*, *Pseudomonas* и *Acinetobacter*, содержащих катаболические плазмиды. Она способна к деградации УВ при их концентрации до 30%, в температурном диапазоне 4–42 °С и в присутствии до 5% соли [44]. Запатентованы микробные ассоциации, в состав которых входят штаммы р. *Acinetobacter*, рекомендуемые для удаления из судовых льяльных вод различных нефтепродуктов [45], а также для очистки и восстановления плодородия почв, контаминированных УВ [46, 47]. Бактерии р. *Acinetobacter*, как в виде монокультуры, так и совместно с МО других родов, являются основой нескольких коммерческих биопрепаратов-нефтедеструкторов, таких как «Олеворин», «Дестройл», «Валентис», «Экойл», «Лессорб-био».

Представители р. *Ochrobactrum* так же как и штаммы *Acinetobacter* spp. активно изучаются с точки зрения использования их для очистки экосистем от нефтяного загрязнения [48, 49]. Обнаружен изолят *O. lupini* MS30, который разрушал 94,6% от общего количества УВ в водной среде и 43,6% – в почве [50]. У штаммов *O. cytisi* RAM03, *O. anthropi* RAM06 и RAM17 эти показатели составляют более 93% в воде и 54% – в почве соответственно [51]. *O. anthropi* HM-1 способен к деструкции отработанного моторного масла на 51–65% [52]. Бактерия *Ochrobactrum* sp. C1 также деградирует отработанные смазочные материалы: её эффективность после 7 сут инкубации составляет 48,5% для моторного масла и 30,5% – для трансформаторного масла [53]. Штамм *Ochrobactrum* sp. обезвреживает нефтешлам, разлагая около 50% УВ, входящих в его состав, за 7 сут культивирования при 28 °С [54], а *O. anthropi* MP3 за 7 сут разрушает 53% УВ в нефтесодержащей сточной воде и синтезирует экзополисахарид, обладающий высокой эмульгирующей активностью в отношении дизельного топлива (60%) [55].

Полициклические ароматические углеводороды – разнообразная группа органических веществ, многие из которых являются сильными канцерогенами. Будучи производными бензола, ПАУ термодинамически устойчивы, плохо водорастворимы и сильно гидрофобны, поэтому они в значительных количествах накапливаются в природных объектах, что делает их одними из приоритетных загрязнителей ОС [56, 57]. Имеются многочисленные сведения о способности бактерий р. *Ochrobactrum* к окислению этих соединений

[58, 59]. Например, *Ochrobactrum* sp. BAP5 разлагает бенз[а]пирен в концентрации 50 мг/л за 30 сут на 20% [56]. Биодеструкция антрацена *O. anthropi* 126 составляла 50% при его начальной концентрации в среде 500 мг/л [60]. Штамм *Ochrobactrum* sp. VA1 разлагал 92% фенантрена с исходной концентрацией 3 мг/л в присутствии 3% NaCl в течение 4 сут [61], а *O. anthropi* BPyF3 был эффективен при деструкции пирена (на 50,4%) и флуорантена (на 49,9%) при их начальном содержании в среде 50 мг/л после 7 сут инкубации [62]. Бактерия *O. anthropi* BD-2.5.3 может разрушать более 40% сырой нефти и н-алканов, а также 25% ПАУ, присутствующих в морской воде [63]. За 80 сут при 30 °С и содержании фракции ПАУ в количестве 24,2 мг/кг почвы, штамм *O. intermedium* разлагал 69,9% загрязнителя, а при содержании в 47,5 мг/кг – 80,7%. *Ochrobactrum* sp. был менее активен в этих условиях, разлагая 44,4 и 27,3% общих ПАУ соответственно. Деструкция бензо[b]-флуорантена штаммом *O. intermedium* составила 81,8%, бенз[а]пирена – 87,0%, у *Ochrobactrum* sp. эти показатели были более низкими – 59,1 и 56,5% соответственно [15]. По мнению авторов [64, 65], высокая способность к деградации УВ и ПАУ, в частности, у представителей р. *Ochrobactrum* связана с тем, что они производят биосурфактанты, которые уменьшают поверхностное натяжение и обладают высокой эмульгирующей активностью, ускоряя тем самым процесс разрушения УВ. Так, бактерии *O. intermedium* продуцируют биосурфактанат гликолипидной природы, который показал стабильность в широких диапазонах pH (2–12 ед.), температуры (25–120 °С) и солёности. Его использование обеспечивает лучшую растворимость нафталина и фенантрена в водной среде [65].

Существует биопрепарат «Охромин» на основе бактерий р. *Ochrobactrum* для очистки почвы и воды от нефти и нефтепродуктов и утилизации нефтесодержащих отходов, применяемый в широком диапазоне температур и pH. Выявлено, что степень разложения нефтешлама с его помощью за один вегетационный период достигала 80–86% [66].

Также как и *Acinetobacter* spp. бактерии р. *Ochrobactrum* входят в состав различных нефтеокисляющих консорциумов. Например, известен консорциум из шести бактериальных штаммов (в том числе *Ochrobactrum* sp.), который осуществлял деградацию 83,7% парафиновой фракции сырой нефти (C_8–C_{35}) [67]. Применение ассоциации, включающей штамм *O. intermedium*, привело к тому, что за 225 сут показатель ХПК нефтесодержащих сточных вод уменьшился на 95%, общее содержание УВ снизилось с 320 до 8 мг/л, а сами воды перестали считаться фитотоксичными [68]. Для очистки стоков нефтеперерабатывающих заводов от ПАУ предложен консорциум из галотермофильных бактерий (в том числе из двух штаммов вида *O. halosaudia)*, который разлагал как низкомолекулярные ПАУ (нафталин, фенантрен, антрацен и флуорен), так и высокомолекулярные (пирен, бенз[а]пирен и бензо[k]флуорантен). Благодаря его применению разложение фенантрена составило 86 и 58% при содержании в среде 20 и 30% NaCl соответственно [69]. Консорциум из бактерий *Ralstonia pickettii, Bacillus* sp., *B. circulans* и *O. anthropic* разлагал нефть на 94,4, 80,3 и 72,0% при её начальном содержании в среде в 5, 10 и 15% соответственно [70]. Почва, загрязнённая смесью дизельного топлива и биодизеля, была дважды обработана ассоциацией, состоящей из бактерий родов *Pseudomonas, Achromobacter* и *Ochrobactrum*, что привело к снижению за 32 сут общего содержания УВ на 32,2% [71]. Из штамма *Ochrobactrum* sp. N1 и трёх представителей р. *Brevibacillus* разработан консорциум, при использовании которого степень деструкции сырой нефти при температуре 25 °С в жидкой среде с 3% NaCl достигала 79%. В условиях, моделирующих морскую среду, этот показатель составил 51,1% [72]. Из нефтезагрязнённого песка выделен консорциум МО *Achromobacter* sp. и *Ochrobactrum* sp., продуцирующий биосурфактант и разрушающий УВ [73].

Имеются данные об ассоциациях, в которые одновременно входят представители родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum*. Так, разработан консорциум, состоящий из штаммов видов *A. baumannii, O. anthropi, P. aeruginosa* и *B. subtilis*, разлагающий УВ фракции C_{12}–C_{22} [74]. Применение природного консорциума, состоящего из бактерий *A. calcoaceticus* ИБ ДТ-5.1/1 и *O. intermedium* ИБ ДТ-5.3/2, эффективно для очистки почв, грунтов, водной поверхности и производственных сточных вод от углеводородного загрязнения, а также обезвреживания нефтесодержащих отходов [75–79]. На его основе создана серия полифункциональных биопрепаратов под торговой маркой «Ленойл»®, предназначенных для снижения содержания УВ в рекультивируемых объектах, а также ускорения восстановления почвы, благодаря азотфиксирующей активности МО, входящих в их состав и

стимуляции роста и развития растений-фиторемедиантов. Разработана и внедрена технология их производства, а сами биопрепараты успешно используются на территории нашей страны и за рубежом.

Заключение

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что на сегодняшний день во всём мире ведётся активная работа по исследованию способностей бактерий родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* к окислению УВ и продукции веществ, ускоряющих этот процесс, выделению природных и разработке искусственных нефтеокисляющих консорциумов, содержащих штаммы *Acinetobacter* spp. и *Ochrobactrum* spp., а также по практическому применению биопрепаратов-нефтедеструкторов на их основе для ликвидации последствий нефтяного загрязнения ОС.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А18-118022190100-9.

References

1. Adams G.O., Fufeyin P.T., Okoro S.E., Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review // Int. Env. Bioremed. Biodegrad. 2015. V. 3. No. 1. P. 28–39. doi: 10.12691/ijebb-3-1-5

2. Koshlaf E., Shahsavari E., Aburto-Medina A., Taha M., Haleyur N., Makadia T.H., Morrison P.D., Ball A.S. Bioremediation potential of diesel-contaminated Libyan soil // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. V. 133. P. 297–305. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.07.027

3. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2019. V. 55. No. 4. P. 344–354. doi: 10.1134/S0003683819040094

4. Ławniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A.P., Heipieper H.J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: a review // Molecules. 2020. V. 25. No. 4. P. 856. doi: 10.3390/molecules25040856

5. Chaudhary D.K., Bajagain R., Jeong S.W., Kim J. Effect of consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil // World J. Microbiol. Biotechnol. 2021. V. 37. No. 3. Article No. 46. doi: 10.1007/s11274-021-02999-3

6. Rudenko E.Yu. Effects of crude oil on the biological activity of chernozem soils // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020. V. 10. No. 4. P. 719–727 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-719-727

7. Tremblay J., Yergeau E., Fortin N., Cobanli S., Elias M., King T.L., Lee K., Greer C.W. Chemical dispersants enhance the activity of oil-and gas condensate-degrading marine bacteria // ISME J. 2017. V. 11. No. 12. P. 2793–2808. doi: 10.1038/ismej.2017.129

8. Varjani S.J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons // Bioresour. Technol. 2017. V. 223. P. 277–286. doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037

9. Ossai I.C, Ahmed A., Hassan A., Hamid F.S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review // Environ. Technol. Innov. 2020. V. 17. Article No. 100526. doi: 10.1016/j.eti.2019.100526

10. Korshunova T.Yu., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikov S.P., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Bacteria of the genus *Pseudomonas* in the sustainable development of agricultural systems and environmental protection (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2021. V. 57. No. 3. P. 281–296. doi: 10.1134/S000368382103008X

11. Jung J., Park W. *Acinetobacter* species as model microorganisms in environmental microbiology: current state and perspectives // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2015. V. 99. P. 2533–2548. doi: 10.1007/s00253-015-6439-y

12. Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review // Front. Microbiol. 2016. V. 7. Article No. e1369. doi: 10.3389/fmicb.2016.01369

13. Kotoky R., Das S., Singha L.P., Pandey P., Singha K.M. Biodegradation of benzo[a]pyrene by biofilm-forming and plant growth promoting *Acinetobacter* sp. strain PDB4 // Environ. Technol. Innovation. 2017. V. 8. No. 11. P. 256–268. doi: 10.1016/j.eti.2017.07.007

14. Tirado-Torres D., Acevedo-Sandoval O., Rodríguez-Pastrana B.R., Gayosso-Canales M. Phylogeny and polycyclic aromatic hydrocarbons degradation potential of bacteria isolated from crude oil-contaminated site // J. Environ. Sci. Health. Part A. Tox. Hazard Subst. Environ. Engin. 2017. V. 52. No. 9. P. 897–904. doi: 10.1080/10934529.2017.1316170

15. Cui J.Q., He Q.S., Liu M.H., Chen H., Sun M.B., Wen J.P. Comparative study on different remediation strategies applied in petroleum-contaminated soils // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. V. 2. No. 17 (5). Article No. 1606. doi: 10.3390/ijerph17051606

16. Lee M., Woo S.G., Ten L.N. Characterization of novel diesel-degrading strains *Acinetobacter haemolyticus* MJ01 and *Acinetobacter johnsonii* MJ4 isolated from oil-contaminated soil // World J. Microbiol. Biotechnol. 2012. V. 28. No. 5. P. 2057–2067. doi: 10.1007/s11274-012-1008-3

17. Huang L., Xie J., Lv B., Shi X., Li G., Liang F., Lian J. Optimization of nutrient component for diesel oil degradation by *Acinetobacter beijerinckii* ZRS // Mar. Pollut. Bull. 2013. V. 76. No. 1–2. P. 325–332. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.03.037332

18. Lei H., Jing X., Xiaofeng S., Jingyan L. Research on the isolation, identification and degradation characteristics of a diesel oil degrading strain // Advanc. Mater. Res. 2013. V. 641–642. P. 206–210. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.641-642.206

19. Podolskii V.P., Bicova A.A., Shevchenko M.U., Gridneva E.V. The application of *Acinetobacter* strains: *A. calcoaceticus* 134 (B-3780), ACKS-1 (B-2838) and *Acinetobacter* sp. (B-5064) for the biodegradation of crude oil and petroleum products in soil // Vestnik Voronezhskogo gos. arkhitekturno-stroitelnogo un-ta. Seriya Fiz.-khim. problemy i vysokie tekhnologii stroitelnogo materialovedeniya. 2014. No. 8. P. 173–177 (in Russian).

20. Lin M., Liu Y., Chen W., Wang H., Hu X. Use of bacteria-immobilized cotton fibers to absorb and degrade crude oil // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2014. V. 88. P. 8–12. doi: 10.1016/j.ibiod.2013.11.015

21. Liu Y., Hu X., Liu H. Industrial-scale culturing of the crude oil-degrading marine *Acinetobacter* sp. strain HC8-3S // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2016. V. 107. P. 56–61. doi: 10.1016/j.ibiod.2015.11.007

22. Fatajeva E., Gailiūtė I., Paliulis D., Grigiškis S. The use of *Acinetobacter* sp. for oil hydrocarbon degradation in saline waters // Biologiya. 2014. V. 60. No. 3. P. 126–133. doi: 10.6001/biologija.v60i3.2971

23. Cai Q., Zhang B., Chen B., Zhu Z., Lin W., Cao T. Screening of biosurfactant producers from petroleum hydrocarbon contaminated sources in cold marine environments // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 86. No. 1–2. P. 402–410. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.06.039

24. Fuentas S., Barra B., Caporaso J.G., Seeger M. From rare to dominant: a fine-tuned soil bacterial bloom during petroleum hydrocarbon bioremediation // Appl. Environ. Microbiol. 2016. V. 82. P. 888–896. doi: 10.1128/AEM.02625-15

25. Karlapudi A.P., Venkateswarulu T.C.C., Tammineedi J., Kanumuri L., Ravuru B.K., Dirisala V.R., Kodali V.P. Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution – a review // Petroleum. 2018. V. 4. No. 3. P. 241–249. doi: 10.1016/j.petlm.2018.03.007

26. Bao M., Pi Y., Wang L., Sun P., Li Y., Cao L. Lipopeptide biosurfactant production bacteria *Acinetobacter* sp. D3-2 and its biodegradation of crude oil // Environ. Sci. Process Impacts. 2014. V. 16. No. 4. P. 897–903. doi: 10.1039/c3em00600j

27. Zou C., Wang M., Xing Y., Lan G., Ge T., Yan X., Gu T. Characterization and optimization of biosurfactants produced by *Acinetobacter baylyi* ZJ2 isolated from crude oil-contaminated soil sample towards microbial enhanced oil recovery applications // Biochem. Engin. J. 2014. V. 90. P. 49–58. doi: 10.1016/j.bej.2014.05.007

28. Onur G., Yilmaz F., Icgen B. Diesel oil degradation potential of a bacterium inhabiting petroleum hydrocarbon contaminated surface waters and characterization of its emulsification ability // J. Surfactants Detergents. 2015. V. 18. No. 4. P. 707–717. doi: 10.1007/s11743-015-1697-3

29. Méndez V., Fuentes S., Morgante V., Hernández M., González M., Moore E., Seeger M. Novel hydrocarbonoclastic metal-tolerant *Acinetobacter* and *Pseudomonas* strains from Aconcagua river oil-polluted soil // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2017. V. 17. No. 4. P. 1074–1087. doi: 10.4067/S0718-95162017000400017

30. Acer Ö., Güven K., Bekler F.M., Gül-Güven R. Isolation and characterization of long-chain alkane-degrading *Acinetobacter* sp. BT1A from oil-contaminated soil in Diyarbakır, in the Southeast of Turkey // Bioremed. J. 2016. V. 20. No. 1. P. 80–87. doi: 10.1080/10889868.2015.1096898

31. Ho M.T., Li M.S.M., McDowell T., MacDonald J., Yuan Z.-C. Characterization and genomic analysis of a diesel-degrading bacterium, *Acinetobacter calcoaceticus* CA16, isolated from canadian soil // BMC Biotechnol. 2020. V. 20. Article No. 39. doi: 10.1186/s12896-020-00632-z

32. Dahal R.H., Chaudhary D.K., Kim J. *Acinetobacter halotolerans* sp. nov., a novel halotolerant, alkalitolerant, and hydrocarbon degrading bacterium, isolated from soil // Arch Microbiol. 2017. V. 199. No. 5. P. 701–710. doi: 10.1007/s00203-017-1349-2

33. Chaudhary D.K., Bajagain R., Jeong S.-W., Kim J. Biodeg radation of diesel oil and n-alkanes (C_{18}, C_{20}, and C_{22}) by a novel strain *Acinetobacter* sp. K-6 in unsaturated soil // Environ. Eng. Res. 2020. V. 25. No. 3. P. 290–298. doi: 10.4491/eer.2019.119

34. Zhang Q., Wang D., Li M., Xiang W.N., Achal V. Isolation and characterization of diesel degrading bacteria, *Sphingomonas* sp. and *Acinetobacter junii* from petroleum contaminated soil // Front. Earth Sci. 2014. V. 8. No. 1. P. 58–63. doi: 10.1007/s11707-013-0415-6

35. Varjani S., Upasani V.N. Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil // J. Environ. Manage. 2019. V. 1. No. 245. P. 358–366. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.070

36. Il'icheva T.N., Mokeeva A.V., Shestopalov A.M., Emel'janova E.K., Alekseev A.Y., Zabelin V.A. Association of strains of bacteria-oil decomposers, and remediation method of oil-contaminated objects // Patent RU 2509159 C2. Application: 2012116827/10, 24.04.2012. Date of publication: 10.03.2014. Bull. 7 (in Russian).

37. Poi G., Aburto-Medina A., Mok P.C., Ball A.S., Shahsavari E. Large scale bioaugmentation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons using a mixed microbial consortium // Ecol. Engin. 2017. V. 102. P. 64–71. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.048

38. Zhan Y.B., Zhang Q., Chen K.L., Li F.M., Ma L.A. Isolation and construction of petroleum-degrading flora and their degrading characteristics // Environ. Poll. Control. 2017. V. 39. P. 860–864.

39. Delegan Y.A., Vetrova A.A., Titok M.A., Filonov A.E. Disign of a consortium of thermotolerant bacteria as the basis for a biopreparation for remediate of oil-con-

taminated soils and waters on hot climate // Biotechnology. 2016. No. 1. P. 53–64 (in Russian).

40. Al-Wasify R.S., Hamed S.R. Bacterial biodegradation of crude oil using local isolates // Int. J. Bacteriol. 2014. Article No. 863272. doi: 10.1155/2014/863272

41. Ma M., Zheng L., Yin X., Gao W., Han B., Li Q., Zhu A., Chen H., Yang H. Reconstruction and evaluation of oil-degrading consortia isolated from sediments of hydrothermal vents in the South Mid-Atlantic Ridge // Sci. Rep. 2021. V. 11. Article No. 1456. doi: 10.1038/s41598-021-80991-5

42. Bidja Abena M.T., Sodbaatar N., Li T., Damdinsuren N., Choidash B., Zhong W. Crude oil biodegradation by newly isolated bacterial strains and their consortium under soil microcosm experiment // Appl. Biochem. Biotechnol. 2019. V. 189. No. 4. P. 1223–1244. doi: 10.1007/s12010-019-03058-2

43. Loginova O.O., Dang T.T., Belousova E.V., Shevchenko M.Yu., Grabovich M.Yu. Prospects for the use of strains B-3780, B-2838, B-5064 bacteria of the genus *Acinetobacter* for the degradation of soil oil pollution // Problemy regionalnoy ekologii. 2011. No. 4. P. 202–208 (in Russian).

44. Vetrova A.A., Zabelin V.A., Ivanova A.A., Adamenko L.A., Delegan Y.A., Petrikov K.V. Oil biodegradation by consortium of oil degrading microorganisms in laboratory model systems // South of Russia: ecology, development. 2018. V. 13. No. 1. P. 184–198 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-1-184-198

45. Loginov Y.O., Loginov O.N., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Stolyarova E.A., Davletshin T.K. Association of *Pseudomonas hunanensis* microorganism strains and *Acinetobacter baumannii* for cleaning marine oil-contaminated water from oil products // Patent RU 2674893 C1. Application: 2018112056, 03.04.2018. Date of publication: 13.12.2018. Bull. 35 (in Russian).

46. Tolkachnikov Y.B., Tolkachnikov K.Y., Kosyanenko Y.V., Titov V.A., Kuznetsov D.N., Gorbunov A.M. Method for remediation of contaminated land // Patent RU 2688282 C1. Application: 2018127116, 23.07.2018. Date of publication: 21.05.2019. Bull. 15 (in Russian).

47. Tretyakova M.S., Belovezhets L.A., Markova Y.A. Microbial preparation for bioremediation of soil contaminated with oil and oil products // Patent RU 2705290 C1. Application: 2019114526, 13.05.2019. Date of publication: 06.11.2019. Bull. 31 (in Russian).

48. Xu B., Yu L., Ma Y., Huang L., Liu B., Wang T., Fu Y. Properties of *Ochrobactrum* of crude oil degrading bacteria and strain screening // Xinjiang Petroleum Geology. 2019. V. 40. No. 2. P. 213–217. doi: 10.7657/XJPG20190215

49. Yani M., Charlena C., Mas'ud Z.A., Anas I., Setiadi Y., Syakti A.D. Isolation, selection and identification of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) degrading bacteria from heavy oil waste (HOW)-contaminated soil // Havaty J. Biosci. 2020. V. 27. No. 2. P. 142–153. doi: 10.4308/hjb.27.2.142

50. Eraky M., Abou-Shanab R.A.I., Salem A.M., Rahman A., Abdel-Gaffar B. Petroleum hydrocarbon degradation potential of *Ochrobactrum lupini* isolated from BTEX enrichment soil // Int. J. Environment. 2015. V. 4. No. 3. P. 204–209.

51. Abou-Shanab R.A., Eraky M., Haddad A.M., Abdel-Gaffar A.B., Salem A.M. Characterization of crude oil degrading bacteria isolated from contaminated soils surrounding gas stations // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2016. V. 97. No. 5. P. 684–688. doi: 10.1007/s00128-016-1924-2

52. Ibrahim H.M. Biodegradation of used engine oil by novel strains of *Ochrobactrum anthropi* HM-1 and *Citrobacter freundii* HM-2 isolated from oil-contaminated soil // 3 Biotech. 2016. V. 6. No. 2. Article No. 226. doi: 10.1007/s13205-016-0540-5

53. Bhattacharya M., Biswas D., Sana S., Datta S. Biodegradation of waste lubricants by a newly isolated *Ochrobactrum* sp. C1 // 3 Biotech. 2015. V. 5. No. 5. P. 807–817. doi: 10.1007/s13205-015-0282-9

54. Obi L.U., Atagana H.I., Adeleke R.A. Isolation and characterisation of crude oil sludge degrading bacteria // Springerplus. 2016. V. 5. No. 1. Article No. 1946. doi: 10.1186/s40064-016-3617-z

55. Ramasamy S., Mathiyalagan P., Chandran P. Characterization and optimization of EPS-producing and diesel oil-degrading *Ochrobactrum anthropi* MP3 isolated from refinery wastewater // Petrol. Sci. 2014. V. 11. No. 3. P. 439–445.

56. Nikitha T., Satyaprakash M., Satya Vani S., Sadhana B., Padal S.B. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: their transport, fate and biodegradation in the environment // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2017. V. 6. No. 4. P. 1627–1639. doi: 10.20546/ijcmas.2017.604.199

57. Varjani S.J., Gnansounou E., Gurunathan B., Pant D., Zakaria Z. Polycyclic aromatic hydrocarbons from petroleum oil industry activities: effect on human health and their biodegradation // Waste bioremediation. Energy, Environment and Sustainability. Springer, Singapore. 2018. P. 185–199.

58. Bello-Akinosho M., Makofane R., Adeleke R., Thantsha M., Pillay M., Chirima J.G. Potential of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterial isolates to contribute to soil fertility // BioMed. Res. Int. 2016. Article No. 5798593. doi: 10.1155/2016/5798593

59. Kumari S., Regar R.K., Manickam N. Improved polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in a crude oil by individual and a consortium of bacteria // Bioresour. Technol. 2018. V. 254. P. 174–179. doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.075

60. Alrumman S.A., Hesham A.E.-L., Alamri S.A. Isolation, fingerprinting and genetic identification of indigenous PAHs degrading bacteria from oil-polluted soils // J. Environ. Biol. 2016. V. 37. No. 1. P. 75–81.

61. Arulazhagan P., Vasudevan N. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a halotolerant

bacterial strain *Ochrobactrum* sp. VA1 // Mar. Poll. Bull. 2011. V. 62. No. 2. P. 388–394. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.09.020

62. Ortega-González D.K., Cristiani-Urbina E., Flores-Ortíz C.M., Cruz-Maya J.A., Cancino-Díaz J.C., Jan-Roblero J. Evaluation of the removal of pyrene and fluoranthene by *Ochrobactrum anthropi*, *Fusarium* sp. and their coculture // Appl. Biochem. Biotechnol. 2014. V. 175. P. 1123–1138. doi: 10.1007/s12010-014-1336-x

63. Doan C.D.P., Sano A., Tamaki H., Pham H.N.D., Duong X.H., Terashima Y. Identification and biodegradation characteristics of oil-degrading bacteria from subtropical Iriomote Island, Japan, and tropical Con Dao Island, Vietnam // Tropics. 2016. V. 25. No. 4. P. 147–159. doi: 10.3759/tropics.MS16-01

64. Bezza F.A., Beukes M., Chirwa E.M.N. Application of biosurfactant produced by *Ochrobactrum intermedium* CN3 for enhancing petroleum sludge bioremediation // Proc. Biochem. 2015. V. 50. No. 11. P. 1911–1922. doi: 10.1016/j.procbio.2015.07.002

65. Ferhat S., Alouaoui R., Badis A., Moulai-Mostefa N. Production and characterization of biosurfactant by free and immobilized cells from *Ochrobactrum intermedium* isolated from the soil of southern Algeria with a view to environmental application // Biotechnol. Biotechnological Equip. 2017. V. 31. No. 4. P. 733–742. doi: 10.1080/13102818.2017.1309992

66. Sokolov L.I. Processing and disposal of oily waste. Moskva: Infra-Engineering, 2017. 160 p. (in Russian).

67. Varjani S.J., Rana D.P., Jain A.K., Vivek S.B., Upasani N. Synergistic *ex situ* biodegradation of crude oil by halotolerantbacterial consortium of indigenous strains isolated from on shore sites of Gujarat, India // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2015. V. 103. P. 116–124. doi: 10.1016/j.ibiod.2015.03.030

68. Gargouri B., Karray F., Mhiri N., Aloui F., Sayadi S. Application of a continuously stirred tank bioreactor (CSTR) for bioremediation of hydrocarbon-rich industrial wastewater effluents // J. Hazard. Mater. 2011. V. 189. No. 1–2. P. 427–434. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.057

69. Pugazhendi A., Qari H., Al-Badry Basahi J.M., Godon J.J., Dhavamani J. Role of a halothermophilic bacterial consortium for the biodegradation of PAHs and the treatment of petroleum wastewater at extreme conditions // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2017. V. 121. P. 44–54. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.03.015

70. Rinanti A., Nainggolan I.J. Petroleum residues degradation in laboratory-scale by rhizosphere bacteria isolated from the mangrove ecosystem // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. V. 106. Article No. 012100. doi: 10.1088/1755-1315/106/1/012100

71. Colla T.S., Andreazza R., B cker F., de Souza M.M., Tramontini L., Prado G.R., Frazzon A.P., Camargo F.A., Bento F.M. Bioremediation assessment of diesel-biodiesel-contaminated soil using an alternative bioaugmentation strategy // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2014. V. 21. No. 4. P. 2592–2602. doi: 10.1007/s11356-013-2139-2

72. Bao M., Wang L., Sun P., Cao L., Zou J., Li Y. Biodegradation of crude oil using an efficient microbial consortium in a simulated marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2012. V. 64. No. 6. P. 1177–1185. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.03.020

73. Primeia S., Inoue C., Chien M.-F. Potential of biosurfactants' production on degrading heavy oil by bacterial consortia obtained from tsunami-induced oil-spilled beach areas in Miyagi, Japan // J. Mar. Sci. Eng. 2020. V. 8. Article No. 577. doi: 10.3390/jmse8080577

74. Leal P.L., Pinheiro Dadalto S., Fernandes R. de C.R., Queiroz M.E.L.R., Tótola M.R. Enrichment of population density of a bacterial consortium during bioremediation of a soil under successive contaminations with diesel oil // Acta Sci. Biol. Sci. 2018. V. 40. No. 1. Article No. e36904. doi: 10.4025/actascibiolsci.v40i1.36904

75. Korshunova T.Y., Loginov O.N. Experience of application of consortium of microorganisms-destructors for neutralization of oil waste // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. No. 3 [Internet resource] http://www.science-education.ru/117-13407 (Accessed: 20.03.2020).

76. Loginov O.N., Sultanov I.M., Chetverikov S.P., Davletshin T.K., Korshunova T.Yu., Stolyarova E.A., Mukhamatdyarova S.R., Kobyzeva N.V. Consorcium of strains of microorganisms *Acinetobacter* sp. and *Ochrobactrum* sp., used for purification of water and soil from oil and oil products // Patent RU 2553540 C2. Application: 2012151289/10, 29.11.2012. Date of publication: 20.06.2015. Bull. 17 (in Russian).

77. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Prospects of using a consortium of hydrocarbon-oxidizing microorganisms for cleaning oil-polluted soil of the extreme north // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 88–94 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-095-097

78. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Method for water surface purification from oil pollution // Patent RU 2627598 C2. Application: 2015157018, 29.11.2012. Date of publication: 09.08.2017. Bull. 22 (in Russian).

79. Korshunova T.Yu., Bakaeva M.D., Loginov O.N. Polyfunctional biopreparations-crude oil destructors: the effect on plants and the content of oil in the soil // Ecology and Industry of Russia. 2018. V. 22. No. 9. P. 18–22 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-9-18-22

УДК 579.69;579.262;582.232 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030

Цианобактериальные симбиозы и возможность их практического использования (обзор)

© 2021. Л. И. Домрачева[1, 2], д. б. н., профессор,
А. Л. Ковина[1], к. б. н., доцент, Л. В. Кондакова[2, 3], д. б. н., профессор,
Т. Я. Ашихмина[2, 3], д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
[1]Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
[2]Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
[3]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: dli-alga@mail.ru

Среди про- и эукариотных микроорганизмов существенную роль в прошлом и настоящем планеты играют цианобактерии (ЦБ), осуществляющие два автотрофных процесса: оксигенный фотосинтез (по углероду) и азотфиксацию (по азоту). В процессе длительной эволюции эти организмы выработали систему защиты от комплекса абиотических и биотических факторов путём разнообразных морфологических и химико-физиологических особенностей. Выделение значительного количества экзометаболитов различной химической природы служит защитой для перенесения таких стрессовых факторов, как иссушение, промораживание, избыточная инсоляция. Формирующиеся слизистые чехлы ЦБ становятся местом обитания других микробов: гетеротрофных бактерий, грибов, водорослей, простейших, получающих определённую эконишу и постоянный источник питания. Симбиотические связи могут быть очень прочными и приводить к созданию агломераций в виде макроскопических налётов, корочек и так называемых биоплёнок. Привлекая круг полезных для себя сожителей, ЦБ в то же время регулируют их состав путём удаления нежелательных вселенцев, выделяя соединения, обладающие антагонистической направленностью.

Экологические возможности ЦБ используются в практических целях при созднии биопрепаратов комплексного действия для нужд земледелия, медицины, биоремедиации загрязнённых вод и почвы.

Ключевые слова: цианобактерии, биоплёнки, симбиоз, экологическая устойчивость, биотехнологический потенциал.

Cyanobacterial symbioses and their practical use (review)

© 2021. L. I. Domracheva[1, 2] ORCID: 0000-0002-7104-3337, A. L. Kovina[1] ORCID: 0000-0003-0503-3402,
L. V. Kondakova[2, 3] ORCID: 0000-0002-2190-686X, T. Ya. Ashikhmina[2, 3] ORCID: 0000-0003-4919-0047,
[1]Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
[2]Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
[3]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: dli-alga@mail.ru

Among pro- and eukaryote organisms cyanobacteria play a considerable role in the past and future of the Earth, they take part in two autotrophic processes: the one with carbon – oxygen photosynthesis and the one with nitrogen – nitrogen fixation. In course of long evolution these organisms have produced a system of protection from a complex of abiotic and biotic factors by means of different morphological and chemical-physiological specific features. The ability to outflux a considerable amount of exometabolites of different chemical nature protects them from such stress factors as siccation, frost penetration, overabundant insolation, as well as makes them a habitat to other microorganisms, such as heterotrophic bacteria, fungi, algae, animalcula, which get a certain eco-niche and a constant source of nutrition. Symbiotic connections can become very strong and lead to creation of agglomerations, such as microscopic blooms, crusts, and so-called bio-films.

Cyanobacteria attract a set of useful symbionts, at the same time they regulate their composition and remove any unwanted colonizers by means of emitting antagonistic exometabolites.

Unique abilities of cyanobacteria and cyanobacterial communities as absolute autotrophs, producers of many bioactive substances, sorbents, and destructors of pollutants of different chemical nature are broadly used in the contemporary world. Biopreparations of complex effect are made on their basis for agriculture, medicine, and bioremediation of contaminated water and soil.

Keywords: cyanobacteria, biofilms, symbiosis, ecological sustainability, biotechnological potential.

Цианобактерии (ЦБ) – процветающая группа микроорганизмов (МО), которые более 3,7 млрд лет успешно осваивают различные биотопы планеты, включая такие экстремальные, как горячие источники и гейзеры, гиперсолёные и щелочные озёра, жаркие и холодные пустыни и полярные льды [1, 2]. Именно появление кислородного фотосинтеза благодаря деятельности ЦБ стало событием, изменившим химический состав поверхности и атмосферы Земли [3, 4]. В эволюции ЦБ важную роль играют вирусы (цианофаги), контролируя их численность, динамику популяций и генетическую диверсификацию в природных сообществах. Цианофаги служат векторами переноса генов, придающих ЦБ новые свойства [5]. Вероятно, с момента появления ЦБ стали прибежищем для других организмов, создавая для партнёров благоприятные условия как в отношении пространственной эконишу, так и в качестве источника органической пищи. Поэтому не случайно, рассматривая экологические и биологические особенности ЦБ, отмечают, что их существование практически запрограммировано на возникновение тесных контактов с другими организмами [6].

Цель данной работы – анализ адаптационных возможностей ЦБ, механизмов формирования симбиозов на их основе и перспектив практического использования цианобактериальных симбиозов.

Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора являются цианобактериальные симбиозы природного и искусственного происхождения, в которых партнёрами ЦБ являются гетеротрофные бактерии, микромицеты, водоросли и высшие растения. Для обзора использованы литературные источники (1969–2021 гг.) из архива авторов, а также проведён поиск по следующим ключевым словам: «цианобактерии», «цианобактериальные симбиозы», «биоплёнки», «экологическая устойчивость», «биотехнологический потенциал» при помощи поисковых систем Яндех и Google, из научной электронной библиотеки eLibrary.ru и ведущих иностранных журналов по этой тематике. Найденную информацию анализировали в соответствии с заявленными разделами статьи.

Причины экологической устойчивости цианобактерий

Цианобактерии развили большое разнообразие биохимических, структурных и биотических адаптаций, обеспечивающих оптимальный рост в любых условиях [7]. Безусловно, одной из уникальных особенностей ЦБ является их способность к одновременному осуществлению двух автотрофных процессов как по углероду (оксигенный фотосинтез), так и по азоту (азотфиксация). Особенности фотосинтеза у ЦБ, помимо прочего, заключаются в том, что они используют в этом процессе не только хлорофилл *a*, но и несколько пигментов билихромопротеидов (фикоэритрин, фикоцианин, аллофикоцианин). При этом фотосинтез у них может быть как оксигенный (при использовании в качестве донора водорода H_2O), так и у некоторых видов аноксигенный (с использованием H_2S) [8]. Они обладают исключительно высокой адаптируемостью к экстремальным условиям среды: промораживанию, иссушению, чередованию циклов замерзания-оттаивания, интенсивному облучению, в том числе УФ, олиготрофности [9]. При этом механизмы азотфиксации и фотосинтеза, а также метаболизма в целом включаются очень быстро (не более, чем через 2 ч) после регидратации и после высушивания, даже при таких небольших осадках, как утренняя роса, или после длительного выдерживания в темноте [10, 11].

Большое значение для выживания колониальных и нитчатых форм ЦБ имеет чехол. Так, например, у *Nostoc commune* было обнаружено, что в слизи, окружающей клетки, существует ретикулярная структура с полигональными ячейками, т. е. слизь структурирована и составляет конституционный покров нитей. Трансформация нити в чехол происходит через последовательное уплотнение размеров ячей сетки [12]. У этого же вида нашли кальциево-

кремниевые слои, образующие физический барьер на поверхности колоний *N. commune* [13]. Обильные внеклеточные полисахариды циано-бактериальных симбиозов (ЦБС), накопленные в период дождей, защищают клетки и в сухой период [14].

Высоким негативным воздействием на любые организмы, включая ЦБ, обладает повышенное ультрафиолетовое излучение. Защитными механизмами к этому фактору у ЦБ являются: синтез защитных соединений, например, таких пигментов как жёлтый сцитонемин и красно-голубой глеокапсин, которые локализируются в чехлах; уход подвижных ЦБ от излучения; функционирование механизмов репарации ДНК; синтез разнообразных каротиноидов, обусловливающих «тушение» активных форм кислорода, а также синтез ферментов каталазы, пероксидазы, супероксиддисмутазы [15]. Физиологические реакции ЦБС на резкие изменения температуры проявляются и в изменении содержания малонового диальдегида, снижении активности фотосинтеза, повышении активности супероксиддисмутазы, большем выделении внеклеточных полисахаридов и уменьшении соотношения светособирающих и светоэкранирующих пигментов [16].

Нехватка элементов питания, в частности, азота, приводит к тому, что одна из каждых 10–20 вегетативных клеток ЦБ превращается в гетероцисту [17]. Фиксирующие азот ферменты чувствительны к присутствию кислорода, и фотосинтетический аппарат претерпевает значительные изменения. В течение 30 ч исчезает фотосистема II и связанный с ней аллофикоцианин, который в вегетативных клетках располагается в фикобилисомах. В гетероцистах сохраняется фотосистема I и элементы фикобилисом с фикоэритроцианином. Фотосистема I обеспечивает энергией фиксацию азота, для которой требуется много АТФ.

При тестировании относительной приспособленности ЦБ к среде в условиях конкуренции между различными их штаммами было установлено, что преимущество получают штаммы с циркадным периодом, сходными с циклическими изменениями свет/темнота. Наличие циркадных часов с периодом, соответствующим циклу условий окружающей среды (ОС), увеличивает приспособленность организмов к среде [18].

Механизмы защиты, выработанные ЦБ в процессе эволюции, позволяют им сохранять свою биологическую активность в меняющемся климате Земли, продолжая удерживать лидирующие позиции среди других групп МО.

Специфика цианобактериальных симбиозов

Цианобактерии образуют симбиозы с широким кругом организмов – про- и эукариот. Факторы, обеспечивающие создание ЦБС, связаны как с особенностями их метаболизма, так и со структурными особенностями. Метаболическая специфика ЦБ опирается на их независимость от связанных соединений углерода и азота вследствие способности к фотосинтезу и азотфиксации [6, 19]. Поэтому они могут существовать в отсутствии органического субстрата, являясь более совершенными автотрофами, по сравнению с растениями, не способными без симбиоза к усвоению молекулярного азота. Наличие у ЦБ дифференцированных клеток двух типов: с фотосинтезирующими пигментами (вегетативные клетки) и непигментированных клеток, но с ферментом нитрогеназой, позволяет ЦБ существовать автономно по отношению к связанным соединениям углерода и азота. Выделение значительного количества слизи не только способствует скреплению отдельных нитей ЦБ в текстуру определённой плотности, но и создаёт благоприятные экониши для таких вселенцев, как гетеротрофные бактерии, грибы, простейшие с формированием настоящих длительно существующих ценозов в виде плёнок и корочек, получивших общее название биоплёнки (БП). На процесс формирования и существования симбиозов в виде БП и их свойства влияют факторы внешней среды и свойства самих организмов. Наиболее важными внешними факторами являются величины pH, солёности, осмолярности, доступность источников питания, а также гидрофобность поверхности раздела фаз, сила и тип движения жидкости относительно этой поверхности [20]. Образование БП – пример сложного социального поведения МО, регулируемого и управляемого не только сигналами из ОС, но и межклеточными сигналами. Они представляют собой мультислой клеток, прикреплённых друг к другу и к поверхности, на которой обитают. Межклеточные общения и образование БП играют ключевую роль во взаимодействии МО с высшими организмами как при симбиозе, так и при патогенезе [21, 22].

В процессе эволюции происходила последовательная «притирка» ЦБ к удобными для них партнёрам и отторжение антагонистов,

способных вызывать какие-либо неблагоприятные последствия для цианобактериальных популяций. Сигналами формирования сообщества и сигналами отторжения являются экзометаболиты ЦБ, в состав которых наряду с углеводами, органическими кислотами, белками входят и такие биологически активные вещества, как фенолы, антибиотики, алкалоиды, токсины, способные вытеснять из занятых эконишей соперников, подавлять их развитие и вызывать гибель [23].

Микробные БП с доминированием ЦБ представляют собой уникальные природные консорциумы с комбинацией таких особенностей, как биологическое разнообразие, простота, малые размеры, быстрая воспроизводимость и экологическая мультифункциональность [2].

Существуют многочисленные примеры микробных цианобактериальных симбиозов с другими МО как в водной, так и в почвенной среде, в которых происходят последовательные смены доминатов и изменения физиологического состояния партнёров. Так, описана структура тройного микробного сообщества (ТМС) в микробных матах Северного моря, представляющих собой сферические объекты, составленные ЦБ, бентосными диатомовыми водорослями и бактериями, взаимно усиливающими размножение друг друга [25]. При этом поверхность ТМС образована плотными переплетающимися нитчатыми ЦБ, захватывающими, как в капкан, диатомеи с одновременным проникновением множества бактерий. Целостность ТМС определяется хемотактическим влиянием и присутствием вторичных продуктов обмена.

Среди ЦБ есть особые пассионарные виды, обладающие длительной вегетацией на поверхности почвы в виде БП и постоянно являющиеся доминантами в ЦБС. К таким видам, с особенными физиологическими свойствами, относится *N. commune*. Эта ЦБ – типичный пример организма-космополита. Её макроскопические сферические колонии с вселенцами других систематических групп МО обнаружены на разных континентах и практически во всех климатических зонах – от Антарктиды до тропиков [26, 27]. В процессе эволюции вид выработал различные адаптивные стратегии к неблагоприятным факторам. В частности, в течение года в условиях сухого и влажного сезонов его жизненный цикл протекает по-разному. Во влажную погоду колонии окружены желеобразной оболочкой, внутри которой клетки активно размножаются. К периоду засухи происходит резкое сокращение размножающихся клеток, образуются акинеты, увеличивается концентрация пигмента фикоэритрина, обеспечивающего толерантность к повышенной инсоляции [28, 29]. При длительном высушивании колонии *N. commune* прекращают метаболитическую активность, но могут восстанавливать способность к росту даже через 100 лет (при сочетании благоприятных условий) [30]. Установлена также ведущая роль экстрацеллюлярных полисахаридов в устойчивости данного вида ЦБ к высушиванию и промораживанию [31]. Клетки, окружённые полисахаридами, способны впитывать даже атмосферную влагу и восстанавливают фотосинтез с выделением O_2 уже при 10% влажности БП *N. commune*. Среди защитных механизмов в отношении УФ большую роль играют микоспоринподобные аминокислоты, состоящие из кольца аминоциклогексенона и содержащие азот- или иминозамещённые спирты, обладающие мультифункциями, в том числе антиоксидантными свойствами. Сильную антиоксидантную активность *N. commune* демонстрируют также такие изолированные из этой культуры соединения, как ностокцианон и сцитонемин [32].

Nostoc commune способен доминировать в растительном покрове антропогенно нарушенных местообитаний. В его талломах содержится от 2,7 до 5,1% общего азота, что в 2–3 раза превышает содержание общего азота в зелёных мхах и опаде травянистых растений степных фитоценозов [33]. В тундровой зоне *N. commune* является одним из самых характерных азотфиксирующих видов [34, 35]. *N. commune* образует макроскопические разрастания, проективное покрытие которых достигает 80–90% на оголённых пятнах и сильно увлажнённых мохово-лишайниковых и осоково-моховых ассоциациях, биомасса может достигать 170 г/м^2. Изучение БП *N. commune*, собранных вдоль обочины шоссейной дороги в Нижегородской области, показало, что численность ЦБ и водорослей в данных консорциях составляет миллиарды клеток на 1 г воздушно-сухой плёнки, численность бактерий – сотни тысяч КОЕ/г, длина грибного мицелия – до 2 км/г [36]. Связь организмов в БП обеспечивается выделением слизи и их агрегацией вследствие наличия мицелиальных и нитчатых форм, обеспечивающих наличие тесных физических контактов организмов. Разнообразие организмов БП *N. commune* способствует их выживанию в меняющихся

условиях среды, связанных как с действием природных, так и антропогенных факторов. В зависимости от характера внешнего воздействия может происходить существенное изменение состава как автотрофного, так и гетеротрофного блоков БП. Было показано, что БП служат источником многовариантных путей протекания аутогенных сукцессий, вызванных антропогенными факторами. Под влиянием таких поллютантов, как пирофосфат натрия, бензин, соли свинца, меди, цинка из однородного первоначального пула клеток развивались сообщества, резко различающиеся по структуре, плотности, доминирующим группировкам [37].

В дефицитных по азоту условиях Арктики именно БП *N. commune* играют основную роль в сукцессионных процессах, становясь источником этого элемента в формирующихся наземных экосистемах высших растений [38].

Таким образом, вероятно, именно космополитные мультивидовые БП *N. commune* представляют существенный интерес в качестве модельной системы как для изучения внутреннего алгоритма поведения симбиотических партнёров в процессе аутогенных и индуцированных сукцессий, так и для практического использования сорбционных и иных возможностей данных БП.

Предрасположенность ЦБ к формированию симбиотических отношений проявляется не только в микромире. Цианобактерии способны осуществлять гормональную регуляцию возникновения симбиоза с растениями, в частности, путём выделения этилена [39]. Распространены симбиозы, которые привели к формированию такого отдела низших растений, как лишайники (или по другим определениям – лихенизированные грибы). При этом, в зависимости от того, входят или нет в состав лишайников только ЦБ или же ЦБ и зелёные водоросли меняются и их основные функции в симбиозе. В моноцианобактериальных формах лишайников ЦБ выполняют функции и фотосинтеза, и азотфиксации, имея до 15% гетероцист в составе нитей, как и в чистых цианобактериальных культурах. В составе водорослево-цианобактериальных композиций ЦБ практически устраняются от функции фотосинтеза, оставляя за собой азотфиксацию, при этом доля гетероцист может доходить до 55%, чего никогда не наблюдается в чистых культурах [40].

Описаны также многочисленные случаи возникновения симбиозов между ЦБ и высшими растениями, в которых взаимовыгодность существования опирается на специфические особенности ЦБ и растений. Известны синцианозы с талломными мхами классов Anthocerotae, Hepaticae, папоротниками рода *Azolla*, голосеменными порядка Cycadales и покрытосеменными рода *Gunnera* [41]. В подобных симбиозах ЦБ получают возможную защиту от хищников и неблагоприятной среды (яркого света и высушивания). Внедрение ЦБ в хозяев, как правило, происходит за счёт коротких обрывков нитей (гормогониев). Они могут инфицировать корни, слоевища, стебли и листья [42]. Иногда подобные симбиозы вызываются химическими сигналами растений – хемоаттрактантами, приводящими к образованию гормогоний у неподвижных нитей ЦБ. В свою очередь, ЦБ, ассоциированные с растениями, могут синтезировать фитогормоны (ауксины, гиббереллины, цитокинины, абсцизовую кислоту, этилен), которые необходимы как посредники в коммуникации между растением-хозяином и его микрофлорой [43].

В симбиотических растительно-цианобактериальных ассоциациях пространственная интеграция и одновременная компартментация партнёров часто сопровождается реорганизацией слизистых поверхностных слоёв МО и формированием межклеточного матрикса, содержащего полисахариды [44]. В некоторых случаях в цианобактериально-растительных симбиозах азотфиксирующие ЦБ имеют очень низкую фотосинтетическую активность, и основное количество сахаров в подобных симбиозах обеспечивается за счёт высшего растения [45].

При вступлении азотфиксирующих ЦБ в симбиоз с растениями морфология и физиология бактерий резко меняются. В 5–10 раз ускоряется дифференциация специализированных структур – гормогониев и гетероцист. Гормогонии выполняют роль инфицирующих единиц, азот фиксируется в гетероцистах и становится доступным как цианобактериальному, так и растительному партнёрам функциональной ассоциации [46]. Растение-хозяин в процессе формирования синцианоза также претерпевает морфо-анатомические изменения, в результате которых образуются специализированные структуры, вмещающие микроколонии цианобионта [44]. Формирование симбиоза с высшими растениями приводит к модификационным изменениям обоих партнёров и обусловливает их жизнеспособность в условиях, не благоприятных для раздельного существования.

Изучение симбиозов между ЦБ и, например, мхами-печёночниками, показало, что происходит постоянная миграция азота от ЦБ к гаметофиту и спорофиту за счёт выделения экссудата, экскретируемого печёночником и являющегося хемоаттрактантом для симбиотических ЦБ. В то же время, особенно в темноте, осуществляется активная миграция метаболитов фотосинтеза мха из спорофита через гаметофит непосредственно к клеткам ЦБ. Экссудаты мха в условиях голодания по азоту индуцируют образование гормогониев, которые и инфицируют растение [47–49]. В зависимости от природы экссудатов мхов может происходить или стимулирование образования гетероцист из вегетативных клеток, или же происходит подавление дифференциации гормогониев [50]. У печёночников и ЦБ выявлены альтернативные пути развития азотфиксирующих симбиотических ЦБ в зависимости от природы растительных выделений.

Классическим примером является симбиоз между водным папоротником *Azolla* spp. и ЦБ *Anabaena azollae*, в котором ЦБ поселяется в углублениях на дорзальной листовой части азоллы. Цианобионты при этом проявляют специфичность в отношении различных видов хозяина [26, 51]. Благодаря высокому накоплению азота, данный симбиоз ещё со средних веков используется как зелёное удобрение на рисовых полях Вьетнама.

В симбиозах с саговниками ЦБ обитают в зоне между внутренней и наружной корой коралловидных корней саговников. При этом активность азотфиксации и численность их гетероцист сравнимы с соответствующими показателями свободноживущих форм [52].

Нитрогеназная активность обнаружена в образцах ряски. Этот показатель тесно коррелирует с плотностью колоний ЦБ на поверхности растения. Предполагают, что ряска является наиболее благоприятной средой обитания для ЦБ, которые, в свою очередь, улучшают азотное питание растений [53].

Помимо природных симбиозов, возможно создание искусственных консорциумов ЦБ с другими МО. Ярким примером могут служить экспериментальные циано-актиномицетные ассоциации, в которых происходит изменение накопления хлорофилла *a* и азотфиксирующей активности ЦБ по сравнению с монокультурой [54, 55]. Кроме того, расширяется спектр антимикробной и сорбционной активности многовидовых цианобактериальных ассоциаций по сравнению с составляющими их компонентами, что показано на примере использования ЦБ *Fischerella muscicola* в искусственно сконструированных БП со стрептомицетами, а также моно-, бинарных и трёхкомпонентных БП с ЦБ *Nostoc muscorum* и *N. paludosum* [56, 57]. В данных работах показано, что тройная ассоциация имеет потенциал биопротектора в условиях повышенного содержания в ОС соединений меди, а также в присутствии фузариотоксинов. Мощное противофузариозное действие тройной ассоциации ЦБ проявляется в значительном снижении количества грибных пропагул и длины мицелия.

Таким образом, образование симбиозов с другими МО и высшими растениями приводит к улучшению условий существования всех партнёров за счёт различных механизмов изменения их морфофизиологических и биохимических особенностей.

Биотехнологическое использование цианобактериальных симбиозов

Многовидовые БП, состоящие из гетеротрофных или фототрофных МО, включая ЦБ, широко применяются в различных отраслях биотехнологии, связанных с производством аминокислот, антибиотиков, ростовых веществ, ферментов, гормонов, витаминов, полисахаридов, биогаза [37, 58]. Кроме того, выделяют такие сферы практического применения БП как очистка сточных и грунтовых вод, а также почв от загрязнения [59]. Данные возможности ЦБ обусловлены разнообразием метаболических процессов и способностью к утилизации ксенобиотиков в качестве пищевого субстрата. С этой целью перспективными объектами являются ЦБ и ЦБС, выделенные из различных экстремальных местообитаний. Известно, что определённые виды ЦБ выживают при любых видах загрязнения ОС. Например, было обнаружено 59 видов ЦБ в 4 типах промышленных стоков. В стоках сахарного завода – 55, красильной фабрики – 54, целлюлозной фабрики – 45 и фармацевтического завода – 30 [60]. Доминантами среди них были виды родов *Oscillatoria, Phormidium, Lyngbya*. Наличие полисахаридов в качестве компонента матрикса ЦБС способствует аккумуляции тяжёлых металлов (ТМ) на поверхности БП. В природных условиях ЦБС могут использоваться в процессах биоремедиации загрязнённых территорий. Так, например, показано, что

ЦБС техногенных систем, подверженных влиянию различных поллютантов, способствуют активизации процессов деградации загрязняющих органических веществ [61]. Поэтому вполне очевидно, что на основе ЦБС возможна разработка новых методов и приёмов реабилитации техногенных водных и почвенных объектов.

Практическое использование ЦБС возможно в различных направлениях и опирается на свойства отдельных партнёров и синцианозов в целом. Цианобактерии являются источником биологически активных соединений с противовирусной, антибактериальной, противогрибной и противораковой активностями [62], что представляет существенный интерес в медицинских и фармакологических исследованиях. Возрастание микробной устойчивости к медикаментам уже стало одной из главнейших современных проблем. Поэтому ведётся постоянное тестирование различных видов ЦБ, обладающих антагонистической активностью по отношению к патогенным и токсикогенным МО. Обнаружено, например, что экстракты из культур трёх родов ЦБ (*Fisherella, Oscillatoria, Anabaena*) обладают ярко выраженной антимикробной активностью против 7 тестируемых МО): 5 видов бактерий (*Staphylococcus* ***aureus, Bacillus cereus, Escherichia coli***, *Pseudomonas aeruginosa, Salmonella typhmurium*) и 2 видов грибов (*Aspergillus niger, Candida albicans*) [63]. В медицинской практике тестируется новый антибиотик парсигин, выделенный из *F. ambigua*, который обладает ярко выраженной антибактериальной и антигрибной активностью против *Staphylococcus epidermidis* и *Candida krusel* [64].

В практике земледелия известны приёмы, основанные на использовании ЦБС. Особенно это актуально для засушливых районов, где из-за нехватки влаги происходит разрушение и эрозия почвы, приводящие к существенному снижению продуктивности сельскохозяйственных экосистем. Реабилитация подобных почв возможна благодаря стимуляции развития почвенных цианобактериальных БП, содержащих подходящую комбинацию МО, способствующих агрегации почвенных частиц за счёт наличия внеклеточного полимерного матрикса, способного удерживать влагу [65, 66].

В бедных песчаных почвах БП с доминированием азотфиксирующих ЦБ не только обогащают их азотом, но способны иммобилизовать излишки аммония и нитратов, сохраняя их в песчаной почве. Кроме того, под цианобактериальными БП происходит смягчение почвенного микроклимата, так как изменения влаги и температуры сдерживаются под БП по сравнению с почвой, лишённой растительности и без ЦБС [67]. Инокуляция БП или стимулирование их развития *in situ* ведут к большей устойчивости почвенных агрегатов за счёт сетчато-нитчатой структуры подобных БП, скрепляющих агрегаты [68]. Более того, инокуляция ЦБС в пустынных районах ускоряет восстановление утраченного разнообразия и облегчает сукцессии в растительных сообществах [69].

Среди экологически значимых свойств ЦБС можно выделить их способность к сорбции ТМ. В частности, подробно изучены особенности сорбции кадмия, меди, свинца [70–73]. В целом, полагают, что ЦБ и ЦБС являются перспективными объектами для разработки методов очистки загрязнённых вод и почвы от ТМ, так как уровень сорбции из растворов может достигать 96–99%. Цианобактерии являются тонкими биоиндикаторами в экологической оценке почвенной среды. Реакция ЦБ на антропогенную и техногенную нагрузку проявляется в изменении их видового разнообразия и количественных характеристик [74].

В целом роль ЦБС в глобальной экологии состоит в том, что они первыми заселяют бесплодные каменистые субстраты и аридные почвы, при этом ключевым моментом в адгезии ЦБ твёрдой поверхности является экзополисахаридный матрикс [75]. Он приклеивает клетки к твёрдой поверхности; стабилизирует их агрегаты; обеспечивает относительное постоянство внутренней среды консорциума; препятствует высыханию, воздействию флуктуации температуры и солнечной радиации.

Наиболее экзотично выглядят предположения о возможности использования антарктических ЦБС для создания условий жизни на Марсе, формирования там почвы при участии ЦБ, аккумуляции воды в слизистых капсулах с вероятностью сохранения жизни и других обитателей БП, а также обеспечения астронавтов во время полётов органической пищей [76, 77].

Таким образом, ЦБС являются перспективным объектом для получения биологически активных веществ, используемых в медицине, ветеринарии, растениеводстве. Кроме того, ЦБС способствуют структурированию разрушенных почв и их детоксикации от различных видов загрязнения.

Заключение

Цианобактериальные симбиозы в природе, развивающиеся до макроразрастаний в виде БП, представляют собой значительный интерес как в теоретическом, так и в практическом аспектах. Быстрый ход сукцессионных процессов в БП, разнообразие партнёров, определяемых способностью вступать в симбиотические отношения как с МО, так и с высшими растениями, позволяют постоянно углублять знания о типах экологических связей.

Изучение специфики морфофизиологических механизмов защиты от внешних воздействий даёт теоретическую основу для создания многофункциональных биопрепаратов, в которых эксплуатируются уникальные возможности ЦБ и ЦБС как абсолютных автотрофов, продуцентов широкого круга биологически активных веществ, сорбентов и деструкторов загрязнителей различной химической природы.

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

References

1. Amand A.S., Hoover R.B., Jerinan G., Coston J., Rozanov A.Y. Morphology and elemental composition of recent and fossil cyanobacteria // Conference on Astrobiology and Planetary Mission. 2005. V. 5906. P. 590–603. doi: 10.1117/12.624854

2. Elliott D.R., Thomas A.D., Hoon S.R., Sen R. Niche partitioning of bacterial communities in biological crust and soil under grasses, shrubs and trees in the Kalahari // Biodivers Conserv. 2014. V. 23. P. 1709–1733. doi. 10.1007/s10531-014-0684-8

3. Birger R., Ian R.F., Jochen J.B., Matt R.K. Reassessing the first appearance of Eukaryotes and Cyanobacteria // Nature. 2008. V. 455. No. 7216. P. 1101–1104. doi: 10.1038/nature07381

4. Levit G.S., Gorbushina A.A., Krumbein W.E. Geophysiology of cyanobacterial biofilms and the dyssymmetry principle // Bulletin de I Institut Oceanographique, Monaco, 1999. P. 175–196.

5. Shestakov S.V., Karbysheva E.A. The role of viruses in evolution of Cyanobacteria // Uspekhi sovremennoy biologii. 2015. V. 135. No. 2. P. 115–127 (in Russian).

6. Pankratova E.M. Establishment of functional peculiarities of Cyanobacteria all the way of their evolutionwith biosphere // Theoretical and Applied Ecology. 2010. No. 3. P. 4–11 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-004-011

7. Paerl H.W. Microscale physiological and ecological studies of aquatic Cyanobacteria // Microsc. Res. and Techn. 1996. V. 33. No. 1. P. 47–72.

8. Pankratova E.M. Soil cyanobacteria in the past of the Earth. Their ecological role in the present and their possible role in the future // Ecology and soils: Vseros. shkola. Izbrannye lektsii. Pushchino, 2001. P. 39–48 (in Russian).

9. Scanlan D. Cyanobacteria: Ecology, niche adaptation and genomics // Microbiology Today. 2001. V. 28. P. 128–130.

10. Coxson D.S., Kershaw K.A. The pattern of in situ summer nitrogenase activity in terrestrial *Nostoc commune* from Stipa-Bouteloa grass // Can. J. Bot. 1983. V. 61. No. 10. P. 2686–2693.

11. Torres-Maza A., Yupanqui-Bacilio C., Castro V. Comparison of the hydrocolloids *Nostoc commune* and *Nostoc sphaericum*: Drying, spectroscopy, rheology and application in nectar // Scientia Agropecuaria. 2020. V. 11. No. 4. P. 583–589. doi: 10.17268/sci.agropecu

12. Bazzichelli G., Abdelhahad N., Ventola F. Structural modifications in the extracellular investment of *Nostoc commune* Vauch during the life cycle. I. Motile and nonmotile hormogonium, biseriate stage // J. Ultrastruct. 1985. V. 91. P. 174–181.

13. Whitton B.A., Simon J.W., Grainger S.L.J. Phosphatase activity of the blue-green alga (cyanobacteria) *Nostoc commune* UTEX 584 // Phycologia. 1990. V. 29. P. 139–145.

14. Williams W.J., Bűdel B., Reichenberger H., Rose N. Cyanobacteria in the Australian northern savannah detect the difference between intermittent dry season and wet season rain // Biodiversity and Conservation. 2014. V. 23. P. 1827–1844.

15. Castenholz R.W. Strategies of UV resistance and tolerance in cyanobacteria // 10th Int. Symp. Phototroph. Prokaryotes: ISPP 2000 Programm and Barcelona, 2000. P. 51.

16. Wang W., Wang Y., Shu X., Zhang Q.J. Physiological responses of soil crust-forming cyanobacteria to diurnal temperature variation // J. Bas. Micro. 2013. V. 53. No. 1. P. 72–80.

17. Shigeichi K., Masashi A., Makoto H. Transformation of thylakoid membranes during differentiation from vegetative cell into heterocyst visualized by microscopic spectral imaging // Plant Physiol. 2013.V. 161. No. 3. P. 1321–1333. doi: 10.1104/pp.112.206680

18. Teng S., Mukherji S., Moffit J.R., de Buyl S., O'Shea E. K. Robust circadian oscillations in growing cyanobacteria require transcriptional feedback // Science. 2013. V. 340. No. 6133. P. 737–740.

19. Pankratova E.M., Trefilova L.V. Symbiosis as basisfor existence of cyanobacteria in nature and *in vitro* // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 1. P. 4–14 (in Russian).

20. Nicolayev Yu.A., Plakuniv V.K. Biofilm – is it "a city of microbes" or is it analogous to a multicellular organism? // Microbiologiya. 2007. V. 76. No. 2. P. 149–163 (in Russian).

21. Smirnova T.A., Didenko L.V., Azizbekyan R.R., Romanova Yu.M. Structural-functional characteristics of bacterial biofilms // Microbiologiya. 2010. V. 79. No. 4. P. 435–446 (in Russian).

22. Romanova Yu.M., Smirnova T.A., Andreyev A.L., Ilyina T.S., Didenko L.V., Ginzburg A.L. Biofilms formation as an example of bacteria's "social" behavior // Microbiologiya. 2006. V. 75. No. 4. P. 556–561 (in Russian).

23. 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

24. Bowker M.A., Maestre F.T., Eldridge D., Belnap J., Castillo-MonroyA., Escolar C., SoliveresS. Biological soil crusts (biocrusts) as a model system in community, landscape and ecosystem ecology // Biodiversity and Conservation. 2014. V. 23. P. 1619–1637. doi: 10.1007/s10531-014-0658-x

25. Brehm U., Krumbein W.E., Palinska K.A., Microbial spheres: a novel cyanobacterial-diatom symbiosis // Naturwissenschaften. 2003. V. 90. No. 3. P. 136–140. doi: 10.1007/s00114-003-0403-x.

26. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).

27. Mollenhauer D. Blaualgen der Gattung *Nostoc* – ihre Rolle in Forschung und Wissenschaft geschichte // I. Natur und Museum. 1985. V. 115. No. 10. P. 305–319 (in German).

28. Ramirez M., Hernandez-Marine M., Mateo P., Berrendero E., Roldan M. Polyphasic approach and adaptative strategies of *Nostoc* cf. *commune* (Nostocales, Nostocaceae) growing on Mayan monuments // Fottea 11. 2011. V. 1. P. 73–86.

29. Kviderova J., Elster J., Šimek M. *In situ* response of *Nostoc commune* s.l. colonies to desiccation in Central Svalbard. Norwegian High Arctic // Fottea 11. 2011. V. 1. P. 87–97.

30. Nazifi E., Wada N., Asano T., Nishiuchi T., Iwamuro Y., Chinaka S., Matsugo S., Sakamoto T. Characterization of the chemical diversity of glycosylated mycosporine-like amino acids in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune* // J. PhotochemPhotobiol B. 2015. V. 142. P. 154–168. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2014.12.008.2015

31. Tamuru Y., Takani Y., Yoshida T., Sakamoto T. Crucial role of extracellular polysaccharides in desiccation and freezing tolerance in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune* // Applied and Environmental Microbiology (AEM). 2005. V. 71. No. 11. P. 7327–7333. doi: 10.1128/AEM.71.11.7327-7333.2005

32. Ninomiya M., Saton H., Yamaguchi Y., Takenaka H., Koketsu M. Antioxidative activity and chemical constituents of edible terrestrial alga *Nostoc commune* Vauch. // Bioscience Biotechnology and Biochemistry. 2011. V. 75. No. 11. P. 2175–2177. doi: 10.1271/bbb.110466.2011

33. Yegorova I.N., Shambuyeva G.S., Shergina O.V., Shinen N. Ecology of *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) from South Siberia and Mongolia // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2019. No. 1. P. 16–29 (in Russian).

34. Getsen M.V., Stenins A.S., Patova E.N. Algal flora of Bolshzemelskaya tundra in conditions of anthropogenic impact. Yekaterinburg: UIF "Nauka", 1994. 148 p. (in Russian).

35. Patova E.N., Getsen M.V. *Nostoc commune* (Cyanophyta) in tundra of the Russian sector in the Arctic // Botanicheskiy zhurnal. 2000. V. 85. No. 1. P. 71–80 (in Russian).

36. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Pegushina O.A., Fokina A.I. Biofilms of *Nostoc commune* as a special microbial sphere // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 1. P. 15–19 (in Russian).

37. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Popov L.B., Zykova Yu.N. Bioremidiation potential of soil cyanobacteria (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 1. P. 8–17 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-1-008-017

38. Lenninan R., Chapin D.M., Dickson L.G. Nitrogen fixation and photosynthesis in high arctic forms of *Nostoc commune* // Can. J. Bot. 1993. V. 72. P. 940–945.

39. Hirsch A.M. Hormonal regulation in plant-microbe symbioses (symposium remarks) // Biology of Plant-Microbe Interactions. 2004. V. 4. P. 389–390.

40. Provorov N.A., Tikhonovich I.A., Vorobyev N.I. Symbiosis and symbiogenesis. Sankt-Peterburg: Inform-Navigatir, 2018. 463 p. (in Russian).

41. Gorelova O.A. Cyanobacteria's communication with partner-plants in forming an assotiation // Mikrobiologiya. 2006. V. 75. No. 4. P. 538–543 (in Russian).

42. Adams D.G. Cyanobacterial symbioses // 5 Eurupean Workshop on the Molecular Biology of Cyanobacteria. Stockholm, 2002. P. 65.

43. Tsavkelova E.A., Klimova S.Yu., Cherdyntseva T.A., Netrusov A.I. Microorganisms as producers of growth promoting substances and their application in practice (review) // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2006. V. 42. No. 2. P. 133–143 (in Russian).

44. Baulina O.I., Titel K., Gorelova O.A., Malay O.V., Ewald R. Permeability of mucous surface structures of cyanobacteriafor macromolecules // Microbiology. 2008. V. 77. No. 2. P. 232–240 (in Russian).

45. Ekman M., Picossi S., Campbell E.L., Meeks J.C., Flores E. A *Nostoc punctiforme* sugar transporter necessary toestablish a cyanobacterium-plant symbiosis // Plant. Physiol. 2013. V. 161. P. 1984–1992. doi: 10.1104/pp.112.213116

46. Meeks J.C. Symbiosis between nitrogen-fixing cyanobacteria and plants //BioScience. 1998. V. 48. No. 4. P. 266–276.

47. Stewart W.D., Rodgers G.A. The cyanophyte-hepatic symbiosis // II. Nitrogen fixation and the interchange of nitrogen and carbon // New Phytol. 1977. V. 78. No. 2. P. 459–471.

48. Watts S.D., Knight C.D., Dams D.G. Characterisation of plant exudates inducing chemotaxis in nitrogen-fixing cyanobacteria // The Phototrophic Prokaryotes / Eds. G.A. Peschek, W. Loffenhardt, G. Schmetter. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. P. 679–684.

49. Campbell E.L., BrahamshaB., Meeks J.C. Mutation of an alternative sigma factor in the cyanobacterium *Nostoc punctiforme* results in increased infection of its symbiotic plant partner, Anthocerospunctatus // J. Bacteriol. 1998. V. 180. P. 4938–4941.

50. Meeks J.C., Campbell E., Hagen K., Hanson T., Hitzeman N., Wong F. Developmental alternatives of symbiotic *Nostoc punctiforme* in response to its symbiotic partner Anthocerospunctatus // The Phototrophic Prokaryotes. 1999. P. 665–678.

51. Papaefthimiou D., Van H.C., Lejeune A., Rasmussen U., Wilmotte A. Diversity and specificity of *Azolla-cyanobionts* // J. Psychol. 2008. V. 44. No. 1. P. 60–70. doi: 10.1111/j.1529-8817.2007.00448.x

52. Lindblad P., Bergman B. Glutamine synthetase: activity and localizationin cyanobacteria of thecycads *Cycas revolute* and *Zamia skinneri* // Planta. 1986. V. 169. No. 1. P. 1–7.

53. Duong T.P., Tiedje J.M. Nitrogen fixation by naturally occurring duckweed-cyanobacterial associations // Can. J. Microbiol. 1985. V. 31. No. 4. P. 327–330.

54. Omarova E.O., Zeniva G.M., Orleanskiy V.K., Lobakova E.S. Experimental cyano-actinomycete associations // Vestnik MGU. 2007. Ser. 16. No. 1. P. 3–8 (in Russian).

55. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Lobakova E.S., Nikolaev G.M., Omarova E.O., Ivanova E.A., Savelyev I.B. Morphological and physiological modifications of cyanobacteria in experimental cyanobacterium-actinomycete associations // Microbiology. 2010. V. 79. No. 3. P. 314–320 (in Russian). doi: 10.1134/S0026261710030069

56. Domracheva L.I., Shirokikh I.G., Tovstik E.V., Skugoreva S.G., Reznik E.N. Formation and assessment of the phytoregulatory potential of multispecies biofilms based on *Fischerella muscicola* // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 117–124 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-117-124

57. Fokina A.I., Skugoreva S.G., Domracheva L.I., Kovina A.L. Antagonistic and sorption activity of mono-, binary, and three-species biofilms of soil cyanobacteria // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 119–125 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-119-125

58. Kumar B.N.P., Mahaboobi S., Satyam S. Cyanobacteria: a potential natural source for drug discovery and bioremediation // Jr. of Industrial Pollusion Control. 2016. V. 32. No. 2. P. 508–517.

59. Nozhevnikova A.N., Botchkova E.A., Plakunov V.K. Multi-species biofilms in ecology, medicine, and biotechnology // Microbiology. 2015. V. 84. No. 6. P. 623–644 (in Russian).

60. Subramaniyan V., Nooruddin T., Chokkaiya M. Biodiversity of cyanobacteria in industrial effluents // Acta Bot. Malac. 2007. V. 32. P. 27–34. doi: 10.24310/abm.v32i0.7026

61. Soprunova O.V. Cyanobacteria's functioning in conditions of technogenic ecosystems // Vestnik MGU. Ser. 16. 2006. No. 2. P. 24–29 (in Russian).

62. Abed R.M.M., Dobretsov S., Sudesh K. Applications of cyanobacteria in biotechnology // J. Appl. Microbiol. 2009. V. 106. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1111/j.1365-2672.2008.03918.x

63. Osman R.K., Goda H.A., Higazy A.M. Evalution of some extra- and intracellular cyanobacterial extractsas antimicrobial agents // Int. Jr. of Advanced Research. 2015.V. 3. No. 5. P. 852–864.

64. Ghasemi Y., Yazdi M.T., Shafree A., Shokravi S., Zarrini G.B. Parsiguine, a novel antimicrobial substance from *Fischerella ambigua* // Pharmaceutical Biology. 2004. V. 42. No. 4–5. P. 318–322. doi: 10.1080/3880200490511918

65. Young K.E., Bowker S.C., Reed S.C., Duniway M.C., Belnap J. Temporal and abiotic fluctuations may be preventing successful rehabilitation of soil-stabilizing biocrust communities // Ecological Applications. 2019. V. 29. No. 5. Article No. e01908. doi: 10.1002/eap.1908/full

66. Dubovik I.E., Zakirova Z.R. Algae of the genus *Nostoc* and their role in soil processes // Mirovoye soobshchestvo: problem i puti ikh resheniya. 2004. No. 16. P. 159–165 (in Russian).

67. Veluci R.M., Neher D.A., Weicht T.R. Nitrogen fixation and leaching of biological soil crust communities in mesic temperate soils // Microbial. Ecol. 2006. V. 51. No. 2. P. 189–196.

68. Malam I.O., Le Bissonnais Y., Defarge C., Trichet J. Role of cyanobacterial cover jn structure stability of sandy soils in the Sahelian part of western Niger // Geoderma. 2001. V. 101. No. 3–4. P. 15–30.

69. Lan S., Zhang Q., Wu L., Liu Y., Zhang D., Hu C. Cyanobacterial inoculation facultates the succession of vegetation communities // Environ. Sci. and Technol. 2014. V. 48. No. 1. P. 307–315.

70. Parker D.L., Mihalick J.E., Phude J.L., Plude M.J., Clark T.P., Egan L., Flom J.J., Rai L.C., Kumar H.D. Sorption of metals by extracellular polymers from the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* f. *flos-aquae* strain C3-40 // J. Appl. Phycol. 2000. V. 12. P. 219–224.

71. Hwang K., Kwon G., Yang J., Kim M., Hwang W.J., Youe W., Kim D.-Y. *Chlamydomonas angulosa* (green alga) and *Nostoc commune* (blue-green alga) / microalgae-cellulose composite aerogel beads: manufacture, physicochemical characterzatoin, and Cd(II) adsorption // Materials. 2018. V. 11. Article No. 562. doi: 10.3390/ma11040562

72. Fokina A.I., Skugoreva S.G., Domracheva L.I. Antagonistic and sorption activity of mono-, binary, and three-species biofilms of soil cyanobacteria // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 119–125 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-119-125

73. Gornostayeva E.A., Fokina A.I., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.Yu., Domracheva L.I., Laptev D.S., Slastnikova E.M. Potential of natural *Nostoc commune* biofilms as sorbents of heavy metals in water // Voda: khimiya i ekologiya. 2013. No. 1. P. 93–101 (in Russian).

74. Kondakova L.V., Domracheva L.I. Cyanobacteria of natural and anthropogenic territories of the Kirov region // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy 18 Vseross. nauch.-pract. konf. s mezhdunarp. uchastiyem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2020. P. 18–21 (in Russian).

75. Pinevich A.V., Kozhenkova E.V., Averina S.G. Biofilms and other prokaryotic consortia. Sankt-Peterburg: Himizdat, 2018. 264 p. (in Russian).

76. Banerjee M., Sharma B.D. Mars terraformation: Role of Antarctic cyanobacteria cryptoendoliths // Nat. Acad. Sci. Lett. 2005. V. 28. No. 5. P. 155–160.

77. Jänchen J., Feyh N., Szewzyk U., de Vera J.-P.P. Provision of water by halite deliquescence for *Nostoc commune* biofilms under Mars relevant surface conditions // International Jouurnal of Astrobiology. 2016. V. 15. No. 2. P. 107–118. doi: 10.1017/S147355041500018X

УДК 576.88/89+597.4/5.574.583 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-031-037

Динамика фауны кишечных гельминтов *Perca fluviatilis* (Actinopterygii: Perciformes) в условиях многолетней сукцессии экосистемы

© 2021. М. В. Рубанова, к. б. н., н. с., О. В. Мухортова, к. б. н., с. н. с.,
Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН,
445003, Россия, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10,
e-mail: muhortova-o@mail.ru

Современные методы исследований экосистем водохранилищ основаны на интегрированных данных о структуре сообществ и популяций гидробионтов. Эффективным способом изучения изменений структуры и характера функционирования водных экосистем является анализ совокупностей паразитов рыб. В работе представлены результаты исследований динамики фауны кишечных гельминтов *Perca fluviatilis* и его взаимосвязей с некоторыми кормовыми объектами (зоопланктон, чужеродные виды рыб) в Саратовском водохранилище. Показана возможность практического применения гельминтов хищных рыб, занимающих верхний уровень трофических цепей, в качестве «биологических маркеров», позволяющих определить степень участия видов-инвайдеров в трофических цепях и сукцессионных изменениях биоценоза. На основе комплексного анализа паразитологических и гидробиологических данных определены тенденции и специфика 30-летнего периода сукцессии экосистемы Саратовского водохранилища, связанной с распространением чужеродных видов. Этот процесс включает поэтапное вселение, натурализацию, нарастание численности видов-инвайдеров, активизацию их участия в трофических цепях гидробионтов, изменение экологии рыб и паразитов. Прогнозируется нарастание численности отдельных чужеродных видов и связанные с ним изменения в экологии видов-хозяев, структурно-функциональные перестройки популяций, сообществ (рыбы, зообентос, зоопланктон, паразиты).

Ключевые слова: паразиты окуня, планктонные ракообразные, трансформация водных экосистем, водохранилище, биологические маркеры, чужеродные виды.

Dynamics of intestinal helminth fauna *Perca fluviatilis* (Actinopterygii: Perciformes) in conditions of long-term ecosystem succession

© 2021. M. V. Rubanova ORCID: 0000-0001-9932-6227,
O. V. Mukhortova ORCID: 0000-0002-4134-223X,
Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS,
10, Komzina St., Toglyatti, Russia, 445003,
e-mail: muhortova-o@mail.ru

Modern methods of research on reservoir ecosystems are based on integrated data on the structure of communities and populations of hydrobionts. An effective way of studying changes in the structure and functioning of aquatic ecosystems is to analyze the collections of fish parasites. The work presents the results of studies of the dynamics of the fauna of intestinal helminths *Perca fluviatilis* and its relationships with some fodder objects (zooplankton, alien fish species) in the Saratov reservoir. The possibility of practical use of helminths of predatory fish occupying the upper level of trophic chains as "biological markers" is shown, which allow determining the degree of participation of invader species in trophic chains and successional changes in biocenosis. Based on a comprehensive analysis of parasitological and hydrobiological data, the trends and specifics of the 30-year period of succession of the Saratov reservoir ecosystem associated with the spread of alien species were determined. This process includes phased introduction, naturalization, an increase in the number of invader species, the activation of their participation in the trophic chains of hydrobionts, and a change in the ecology of fish and parasites. An increase in the number of individual alien species and related changes in the ecology of host species, structural and functional restructuring of populations and communities (fish, zooplankton, zoobenthos, parasites) are predicted.

Keywords: parasites on perch, crustacean, water ecosystem transformation, reservoir, biological markers, alien species.

Экологические сукцессии являются естественным процессом, протекающим под действием комплекса природных постоянно и периодически действующих факторов [1]. Экосистемы волжских водохранилищ, кроме природных факторов, испытывают мощное антропогенное воздействие, изменяющее условия обитания организмов [2] и приводящее к антропогенным сукцессиям. В последние три десятилетия экосистема Саратовского водохранилища формировалась в условиях вселения чужеродных видов гидробионтов в сообщества фито- и зоопланктона, макрозообентоса, рыб и паразитов [3]. На фоне увеличения числа чужеродных видов-хозяев количество новых видов паразитов в бассейне Волги с начала 2000-х гг. выросло в три раза [4]. Успех вселения чужеродных видов во многом зависит от степени антропогенного нарушения экосистемы [5]. Инвазионные виды включаются в трофические связи компонентов биоценоза, изменяют среду обитания организмов и экосистему в целом [6, 7]. Инвазии вселенцев относят к ключевым факторам трансформации экосистем [8]. Изменения паразитофауны рыб происходят в процессе экологической сукцессии водоёма и зависят, в том числе, от степени антропогенного воздействия [9]. Гельминты рыб представляют интерес в качестве теста для оценки экологии хозяев и состояния водоёмов, степени и характера структурно-функциональных изменений в водных экосистемах [10–12].

Речной окунь *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 – распространённый палеарктический вид, обычный для Саратовского водохранилища [13]. Для водных объектов Австралии [14] и некоторых других территорий он является видом-интродуцентом. Особенности его биологии и экологии изучены для водоёмов Европы, Европейской части России [15–17]. *P. fluviatilis* способен к освоению различных биотопов и смене типов питания на разных этапах онтогенеза: молодь является зоопланктофагом, подрастая – переходит к эврифагии, взрослый окунь хищничает, способен к каннибализму [18]. Широкое распространение и биологические особенности позволяют использовать вид в качестве тест-объекта для оценки состояния водоёмов [19, 20]. Фауна паразитов *P. fluviatilis* исследована в разнотипных водоёмах России и Европы [21–23]. На видовой состав гельминтов *P. fluviatilis* оказывает влияние богатство ихтиофауны водоёма [24].

Цель работы – обобщить результаты исследований динамики фауны кишечных гельминтов *P. fluviatilis* и его взаимосвязей с некоторыми кормовыми объектами (зоопланктон, чужеродные рыбы) в условиях многолетней сукцессии экосистемы водохранилища.

Тенденции и этапы сукцессионных изменений экосистемы Саратовского водохранилища, связанных с чужеродными видами

Исследования фауны кишечных гельминтов, взаимосвязей *P. fluviatilis* и его паразитов с организмами зоопланктона на среднем участке водохранилища с учётом литературных [25], архивных (ИЭВБ РАН) и оригинальных данных [26] охватывают почти 30-летний период времени (1990–2016 гг.). Отмечены значительные изменения в заражённости *P. fluviatilis* паразитами. Из первоначального (1990–1992 гг.) состава к 2016 г. сохранилось 7 видов. В период 1990–1996 гг. отмечена двукратная смена вида-доминанта: *Camallanus truncatus* (Rudolphi), *Bunodera luciopercae* (Muller), *Camallanus lacustris* (Zoega). Нематода *C. lacustris* с 1996 г. сохраняет доминирующее положение. Также дважды кардинально изменился качественный и количественный состав гельминтов, произошли структурные перестройки в условно выделенных 4 группах паразитов – основные, сопутствующие, редкие, единичные. Из 5 основных видов 4 сохранили этот статус в течение периода исследований. Исключение составил первоначальный доминант – нематода *C. truncatus*, которая с 2013 г. отнесена к сопутствующим видам. Формирование фауны кишечных гельминтов *P. fluviatilis* во времени проходило в 3 этапа, характеризующихся разными составами паразитов. На первом этапе (1990–1992 гг.) фауна гельминтов менее разнообразна и представлена 9 видами, в том числе 5 основными. Не обнаружена зарегистрированная А.В. Бурякиной [25] нематода *Cucullanellus minutus* (Rudolphi) [27]. Второй этап включает 1996–2009 гг., когда у *P. fluviatilis* зарегистрировано 14 таксонов (12 идентифицированы до вида). За 20-летний период видовое разнообразие фауны кишечных гельминтов *P. fluviatilis* увеличилось примерно в 1,5 раза за счёт включения новых сопутствующих, редких и единичных видов, аборигенных для Саратовского водохранилища. На третьем этапе (с 2012 г.) у *P. fluviatilis* формируется современный состав паразитов, включающий 13 таксонов (12 идентифицированы до вида). Изменения состава гельминтов обусловлены

заменой или выпадением (частичным или полным) видов во всех 4 группах, включая основные. Состав паразитов окуня пополнился двумя чужеродными видами: *Nicolla skrjabini* Iwanitzky и *Bothriocephalus acheilognathi* Yamaguti. Сукцессия экосистемы – последовательность сообществ, сменяющих друг друга на данном участке водоёма. Паразитологические данные показывают, что изменения состава и взаимосвязей элементов (рыбы, зоопланктон, макрозообентос, паразиты) биоценоза Саратовского водохранилища происходили поэтапно.

К основным факторам, определяющим состав фауны гельминтов рыб, относятся в числе прочих спектр их питания и состояние кормовой базы водоёма [28]. Циркуляция гельминтов в экосистеме во многом обусловлена изменениями в пищевых цепях гидробионтов [29, 30]. Важным ресурсом *P. fluviatilis* на разных этапах онтогенеза является зоопланктон [26]. Группа планктонных ракообразных – промежуточных хозяев гельминтов *P. fluviatilis*, представлена широко распространёнными, типичными для данного участка водохранилища видами. Их численность достаточно высока, стабильна в межгодовом аспекте, что находит отражение в динамике заражения окуня паразитами. Обнаружены положительные корреляционные связи между экстенсивностью инвазии *P. fluviatilis* паразитами и развитием видов зоопланктона – промежуточных хозяев гельминтов [26]. Это с высокой вероятностью свидетельствует о включении данных планктонных ракообразных в спектр питания окуня и их значимой роли в жизненных циклах паразитов. Межгодовая динамика взаимосвязей «*P. fluviatilis* – зоопланктон – гельминты» согласуется с этапами формирования состава паразитов на данном участке водохранилища. В начале 1990-х гг. с планктонными ракообразными были ассоциированы жизненные циклы 78% видов кишечных гельминтов *P. fluviatilis* [25]. К 1996–2009 гг. доля видов, связанных с зоопланктоном, снизилась до 50%, на современном этапе (с 2012 г.) она составляет 67% [26].

В последние два десятилетия к факторам, определяющим разнообразие фауны кишечных гельминтов *P. fluviatilis*, добавился новый – расселение в водохранилище чужеродных видов [3]. В настоящее время ихтиофауна Саратовского водохранилища представлена 56 видами, из которых 20 – являются чужеродными для водоёма. Бычок-кругляк *Neogobius melanostomus* (Pallas) обнаружен здесь с конца 1960-х – начала 1970-х гг. [31], бычок-головач *Neogobius iljini* (Vasiljeva et Vasiljev) и бычок-цуцик *Proterorhinus marmoratus* (Pallas) зарегистрированы в водохранилище с 1982 г. [32]. По нашим наблюдениям с конца 1990-х *P. fluviatilis* годов чаще включает в рацион питания бычков понто-каспийского комплекса, что нашло отражение в заражённости его кишечными гельминтами. Примером воздействия чужеродных видов на фауну гельминтов *P. fluviatilis* является исчезновение из её состава после 2013 г. цестоды *Triaenophorus nodulosus* (Pallas). Причиной послужило активное включение в спектр питания щуки (облигатный окончательный хозяин) в качестве дополнительного хозяина бычков-вселенцев – *N. iljini*, *N. melanostomus*, *P. marmoratus*, заражённых чужеродной цестодой *Triaenophorus crassus* Forel, 1868 [33]. Это привело к замене *T. nodulosus* на *T. crassus* у щуки *Esoxs lucius* L. и, вследствие этого, к исчезновению паразита у *P. fluviatilis*. Численность планктонных ракообразных – промежуточных хозяев *T. nodulosus* в водохранилище по нашим данным высока. Несмотря на это произошёл разрыв жизненного цикла *T. nodulosus* на уровне окончательного и дополнительного хозяев (щука и окунь), вследствие изменения их трофических связей. В результате на данном участке водоёма произошла замена одного очага триенофороза, образованного *T. nodulosus*, на другой – с участием чужеродной нематоды *T. crassus*.

По литературным сведениям [34], ещё в 1980-х гг. характерной особенностью ихтиоценоза Саратовского водохранилища в трофическом аспекте являлся тот факт, что основной поток вещества и энергии осуществлялся по схеме «бентос – бентофаги – хищные рыбы». Значительно меньший поток проходил через связи «зоопланктон – планктофаги – хищные рыбы». С начала 2000-х гг. в водохранилище складываются более благоприятные условия для развития донных сообществ [35]. В настоящее время увеличение в фауне гельминтов *P. fluviatilis* числа видов, ассоциированных с бентосом и донными рыбами-бентофагами, является свидетельством биотопической близости окуня с придонными местообитаниями. Паразитологические данные указывают на установление в последнее десятилетие более тесных экологических связей окуня с компонентами сообщества макрозообентоса, в том числе с его чужеродной составляющей (рис. 1).

Это определяет поведенческую стратегию *P. fluviatilis* и характеризует его в последнее

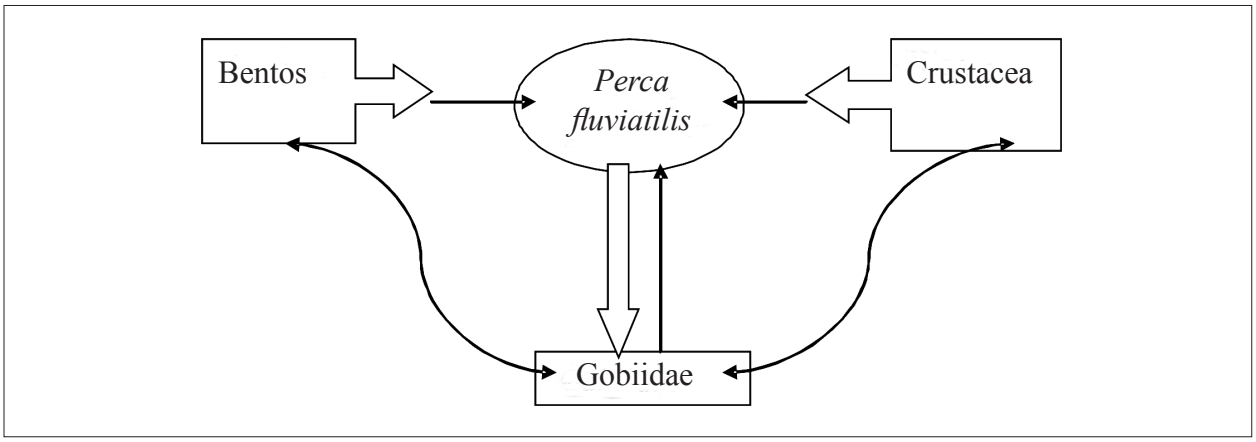


Рис. Пути инвазии *Perca fluviatilis* кишечными гельминтами:
→ – показано проникновение гельминтов, ⇩ – изменения типа питания *Perca fluviatilis*
Fig. Routes of invasion of *Perca fluviatilis* by intestinal helminths:
→ – penetration of helminths is shown, ⇩ – *Perca fluviatilis* nutrition type change

10-летие в большей степени как обитателя придонных биотопов, хотя вид не является типичным бентофагом. В отношении сообщества зоопланктона наблюдается противоположная тенденция некоторого ослабления взаимодействий с отдельными его компонентами – промежуточными хозяевами гельминтов. Это подтверждается снижением доли видов кишечных гельминтов *P. fluviatilis*, развитие которых ассоциировано с зоопланктоном, примерно в 1,5 раза в 1996–2009 гг. по сравнению с началом 1990-х гг. Именно следствием изменения экологии *P. fluviatilis* стала двукратная смена вида-доминанта, которая является косвенным подтверждением структурных преобразований в биотической составляющей экосистемы водохранилища. Доминирование *C. lacustris* в течение последних 20 лет обусловлено двумя факторами: 1) массовостью и доступностью промежуточных хозяев паразита – планктонных ракообразных; 2) укреплением трофических и биотопических связей *P. fluviatilis* с чужеродными бычками понто-каспийского комплекса. При наличии и широком распространении в водохранилище одних и тех же видов планктонных ракообразных – промежуточных хозяев *C. lacustris* (стабильно доминирующий вид) и *C. truncatus* (первоначальный доминант), динамика заражения окуня паразитами развивается в противофазе, в том числе вследствие включения чужеродных рыб в жизненные циклы этих нематод.

Прогноз изменений в экосистеме Саратовского водохранилища

Зарегулирование Волги нарушило привычной ход реки, коренным образом изменило её свойства, многократно увеличило нагрузку на водные ресурсы [36–38]. По прошествии более, чем 10 лет после образования водохранилищ состав паразитов рыб в них постепенно стабилизировался, сформировались достаточно устойчивые паразитарные системы [39]. По наблюдениям автора работы [34] в конце 1980-х гг. бычки-вселенцы уже являлись звеном трофических цепей рыб, но это не нашло значимого отражения в заражённости окуня. Паразитологические данные свидетельствуют о том, что с начала 2000-х гг. экспансия видов-вселенцев приняла широкомасштабный характер. Скорость сукцессионных процессов в экосистеме, обусловленных увеличением численности отдельных видов-интродуцентов, нарастает. Состав фауны кишечных гельминтов *P. fluviatilis* даёт пролонгированный ответ на изменение условий обитания в водоёме. На 1-м этапе сукцессионных изменений она реагировала на происходящие в экосистеме водохранилища процессы с некоторым запозданием, на 2-м – переходном этапе – отразила трансформацию трофических связей гидробионтов как результат включения в них видов-вселенцев, на 3-м этапе – состав гельминтов и показатели заражения *P. fluviatilis* свидетельствуют о нарастании скорости процессов, связанных с инвазиями в экосистеме водоёма.

Прогнозируется активизация участия видов-вселенцев (организмы бентоса, рыбы, паразиты) в трофических цепях биоценоза водоёма, расширение круга их потребителей/хозяев, дальнейшие структурные изменения ихтио-, паразитоценоза, сообществ зоопланктона, макрозообентоса. Наблюдается тенденция

распространения опасных или чужеродных [39] паразитов рыб в биоценозе Саратовского водохранилища, а также паразитов, заканчивающих жизненный цикл в млекопитающих, представляющих потенциальную опасность для человека. Гельминты хищных рыб, занимающих верхний уровень трофических цепей, могут эффективно использоваться в качестве «биологических маркеров», позволяющих определить степень участия видов-инвайдеров (беспозвоночные, паразиты, рыбы), а также паразитов, патогенных для рыб и человека, в трофических цепях биоценоза.

Заключение

Саратовское водохранилище является уникальным по своим характеристикам водоёмом, условия обитания гидробионтов в котором отличаются от любой речной и озёрной экосистемы. После его заполнения (1968 г.) состав биоценоза, в том числе паразитов, претерпел значительные изменения. Ещё в конце 1980-х гг. в водоёме создались условия, более благоприятные для обитания мелких непромысловых рыб, в основном бычков понто-каспийского комплекса, являющихся преимущественно бентофагами. Эти виды в условиях данного водоёма эффективно используют кормовые ресурсы и лучше обеспечены пищей. Неприхотливость к условиям нагула обусловливает высокий темп роста, что ведёт к быстрому наращиванию численности. К началу 2000-х гг. рыбы сем. Gobiidae, благодаря высокому адаптационному потенциалу и экологической пластичности, агрессивной жизненной стратегии закончили период натурализации. В настоящее время они заняли значимые позиции в трофических цепях биоценоза водохранилища и продолжают наращивать численность. Северный вселенец – ротан *Perccottus glenii* Dybowski быстро освоил пойменные озёра, небольшие малопроточные реки, относящиеся к водостоку Саратовского водохранилища. Этот эврифаг также включился в трофические цепи биоценоза водоёмов-реципиентов и стал каналом заноса чужеродной фауны паразитов. Ещё один вид-интродуцент – черноморско-каспийская тюлька *Clupeonella cultriventris* (Nordmann), также закончил период натурализации и занял важное место в трофических цепях как типичный зоопланктофаг и кормовой объект некоторых хищных рыб. В начале 1990-х гг. *C. cultriventris* стала промысловым видом в водохранилище.

В последнее десятилетие особенно заметно действие двух факторов, в значительной степени определяющих структуру биоценоза водоёма:

– исторически сложившийся, постоянно действующий (*const*) – развитие нативных видов планктонных ракообразных – промежуточных хозяев паразитов. Количество видов-вселенцев в сообществах зоопланктона водохранилища растёт, но их местообитание – пелагиаль – не всегда доступно для бóльшей части рыб-зоопланктофагов;

– переменный (*variable*) – вселение, натурализация, включение в трофические цепи рыб и нарастание численности чужеродных видов гидробионтов (рыбы, беспозвоночные, паразиты).

Виды-вселенцы – бычки сем. Gobiidae, обладающие наибольшим инвазионным потенциалом, ротан, тюлька, моллюски включились в жизненные циклы 6 (7) видов кишечных гельминтов окуня. Чужеродная цестода *B. acheilognathi* использует в жизненном цикле типичные виды зоопланктона. Стратегия вселения чужеродных видов гидробионтов в экосистему Саратовского водохранилища соответствует закономерностям, определённым В.А. Догелем: происходит обеднение фауны паразитов рыб, занос чужеродных паразитов, использование аборигенных видов хозяев в жизненных циклах паразитов-вселенцев. Отмечены изменения в жизненных циклах типичных паразитов *P. fluviatilis* за счёт включения в них чужеродных видов гидробионтов. В фауне кишечных гельминтов окуня регистрируются обратимые (основной – сопутствующий вид) и необратимые (сопутствующий – редкий вид) внутриструктурные перестройки. Влияние экологии рыб на формирование фауны их кишечных гельминтов – естественный процесс, отображающий взаимосвязи организма со средой обитания. Динамика состава кишечных гельминтов окуня является косвенным свидетельством успешного окончания периода натурализации отдельных чужеродных видов гидробионтов – в настоящее время структурообразующих элементов ихтио- и паразитоценозов, сообществ макрозообентоса. Комплексное исследование с использованием паразитологических и гидробиологических данных позволило выявить наличие поэтапно протекающей структурно-функциональной трансформации экосистемы водохранилища, обусловленной перестройкой трофических связей рыб в связи с вселением чужеродных видов гидробионтов.

Авторы выражают благодарность д. б. н. А. К. Минееву (ИЭВБ РАН, Тольятти) за определение таксономической принадлежности бычковых рыб в пищеварительном тракте окуней, д. б. н., профессору И. А. Евланову (ИЭВБ РАН, Тольятти) за консультативную помощь в определении видовой принадлежности цестод р. Bothriocephalus.

References

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

2. Rosenberg G.S. Volga Basin: on the road to sustainable development. Tolyatti: IEVB RAN, Kassandra, 2009. 477 p. (in Russian).

3. Evlanov I.A., Kirilenko E.V., Mineev A.K., Mineeva O.V., Mukhortova O.V., Popov A.I., Rubanov M.V., Shemonayev E.V. Influence of alien species of hydrobionts on structural and functional organization of the ecosystem of Saratov reservoir // Izvestiya SamNTs RAN. 2013. V. 15. No. 3 (7). P. 2277–2286 (in Russian).

4. Zhokhov A.E., Pugacheva M.N., Molodozhnikova N.M., Berechikidze I.A. Alien parasite species of the fish in the Volga River basin: A review of rata on the species number and distribution // Russian Journal of Biological Invasions. 2019. V. 10. No. 2. P. 136–152. doi: 10.1134/S2075111719020140

5. Dgebuadze Yu.Yu. Reservoir ecosystems as a model object for environmental research for risk assessments of natural and man-made challenges. Volga basin in the XXI century: structure and functioning of ecosystems of reservoirs // Collection of materials of reports of participants of the All-Russian Conference. Institute of Biology of Inland Waters named after I.D. Papanin RAS, Borok. Izhevsk, 2012. P. 6–7 (in Russian).

6. Vilà M., Hulme P.E. Impact of biological invasions on ecosystem services. Heidelberg: Springer, 2017. 176 p. doi: 10.1007/9783319451213

7. Perova S.N., Pryanichnikova E.G., Zhgareva N.N. Appearance and distribution of new alien macrozoobenthos species in the Upper Volga Reservoirs // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 10. No. 1. P. 30–38. doi: 10.1134/S2075111719010119

8. Biological infusions into aquatic and terrestrial ecosystems / Eds. A.F. Alimov, N.G. Bogutskaya. Moskva, Sankt-Peterburg: Tovarishchestvo nauch. izd. KMK, 2004. 436 p. (in Russian).

9. Reshetnikov Yu.S., Popova O.A., Sterligova O.P., Titova V.F., Bushman L.G., Ieshko E.P., Makarova N.P., Malakhova R.P., Pomazovskaya I.V., Smirnov B.A. Change in the structure of the fish population of the eutrophic reservoir. Moskva: Nauka, 1982. 248 p. (in Russian).

10. Halmetoja A., Valtonen E.T., Koskenniemi E. Perch (*Perca fluviatilis* L.) parasites reflect ecosystem conditions: a comparison of a natural lake and two acidic reservoirs in Finland // International Journal for Parasitology. 2000. V. 30. No. 14. P. 1437–1444. doi: 10.1016/S0020-7519(00)00115-6

11. Dorovsky G.N., Stepanov V.G. Ecological parasitology. Syktyvkar: Izdatelstvo Syktyvkarskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011. 200 p. (in Russian).

12. Valtonen E.T., Holmes J.C., Aronen J., Rautalahti I. Parasite communities as indicators of recovery from pollution: parasites of roach (*Rutilus rutilus*) and perch (*Perca fuviatilis*) in central Finland // Parasitology. 2003. V. 126. P. 43–52.

13. Evlanov I.A., Kozlovsky S.V., Antonov P.I. Inventory of fish of the Samara region. Tolyatti: IEVB RAN, 1998. 222 p. (in Russian).

14. Arthington A., McKenzie F. Review of impacts of displaced // Introduced fauna associated with inland waters. Canberra: Environment Australia, 1997. 69 p.

15. Atlas of freshwater fish of Russia / Ed. Y.S. Reshetnikov. Moskva: Nauka, 2002. 253 p. (in Russian).

16. Couture P., Pyle G. Biology of perch. Boca Raton: CRC Press, 2015. 317 p.

17. Semenov D.Yu. Ecology of perch (*Perca fluviatilis* L.) in the central part of the Kuibyshev reservoir: Abstract of thesis ... cand. biol. sciences. Ulyanovsk, 2004. 21 p. (in Russian).

18. Zavyalov E.V., Ruchin A.B., Khlekhtin G.V., Shashulovsky V.A., Sonin K.A., Tabakishin V.G., Malinin Yu.A., Yermolin V.P., Yakushev N.N., Mosolzhovsky E.U. Fish of the north of the Lower Volga Region: in 3 kn. Prince. 1. Composition of ichthyofauna, methods of study. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 2007. 208 p. (in Russian).

19. Ivanov A.I. The use of living organisms of various taxonomic groups for bioindication of the state of the environment // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 2. P. 73–78 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-2-073-78

20. Gileva T.A., Kostitsyna N.V. The characteristic of peripheral blood and content of heavy metals in tissues and organs of a perch *Perca fluviatilis* (L.) inhabiting water bodies of the Kama basin // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 2. P. 46–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-046-051

21. Rusinek O.T. Parasites of lake Baikal fish (fauna, communities, zoogeography, history of formation). Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2007. 571 p. (in Russian).

22. Behrmann-Godel J. Parasite identification, succession and infection pathways in perch fry (*Perca fluviatilis*): new insights through a combined morphological and genetic approach // Parasitology. 2013. V. 140. V. 4. P. 509–520. doi: 10.1017/S0031182012001989

23. Bielat I., Legierko M., Sobecka E. Species richness and diversity of the parasites of two predatory fish species – perch (*Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758) and zander (*Sander lucioperca*e Linnaeus, 1758) from the Pomeranian Bay // Annals of Parasitology. 2015. V. 61. No. 2. P. 85–92.

24. Protasova E.N., Sokolov S.G., Kazakov B.E., Rubanovich A.V. Contamination of perch in lakes of Karelia with digestive tract parasites: monitoring results 1998–2000 Proceedings of the Center for Parasitology // Transactions of Center for Parasitology. V. XLVI: Biodiversity and Ecology of Parasites / Ed. S.A. Beer. Moskva: Nauka, 2010. P. 212–221 (in Russian).

25. Buryakina A.V. Parasitofown fish of the Saratov reservoir (fauna, ecology): Dis. ... edging. biol. sciences. Sankt-Peterburg: GOSNIORKh, 1995. 384 p. (in Russian).

26. Rubanova M.V., Mukhortova O.V., Poddubnaya N.J. Dynamics of helminth fauna of the digestive tract of *Perca fluviatilis* (Actinopterygii: Perciformes) and its relationship with the zooplankton in the Samara Luka national park // Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka. 2020. No. 5 (1). P. 64–86 (in Russian). doi: 10.24189/ncr.2020.009

27. Determinant of parasites of freshwater fish of the fauna of the USSR. V. 3. Parasitic multicellular. (The second part). Determiners by fauna of the USSR. V. 149 / Ed. O.A. Scarlato. Leningrad: Nauka, 1987. 583 p. (in Russian).

28. Dogel V.A. General parasitology. Edinburgh & London: Oliver & Boyd Ltd., 1964. 516 p.

29. Lafferty K.D. Biodiversity loss decreases parasite diversity: theory and patterns // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2012. V. 367. P. 2814–2827. doi: 10.1098/rstb.2012.0110

30. Galaktionov K.V. Patterns and processes influencing helminth parasites of Arctic coastal communities during climate change // Journal of Helminthology. 2017. V. 91. No. 4. P. 387–408. doi: 10.1017/S0022149X17000232

31. Gavlena F.K. Ihtiofaun of the Sock River and its tributaries // Volga–1. Problems of studying and rational use of biological resources of water bodies: Materials of the first conf. On the study of water bodies of the Volga basin. Kuybyshev: Kuybysh. kn. izd-vo, 1971. P. 224–261 (in Russian).

32. Kozlovskaya S.I. Gobiidae in Saratov Reservoir // Voprosy ikhtiologii. 1997. V. 37. No. 3. P. 420 (in Russian).

33. Mineeva O.V., Mineev A.K. The invasive cestode *Triaenophorus crassus* Forel, 1868 (Cestoda, Pseudophyllidea) in fish of the Saratov Reservoir // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki. 2019. V. 161. No. 2. P. 325–338 (in Russian). doi: 10.26907/2542-064X.2019.2.325-338

34. Yermolin V.P. Trophic connections of fish of Saratov reservoir and measures to increase its fish productivity // Factors of formation of fish productivity of reservoirs and ways of its increase. Leningrad, 1986. V. 242. P. 50–58 (in Russian).

35. Kurina E.M., Zinchenko T.V., Popchenko T.V. Long-term dynamics of the benthos of the Saratov reservoir with emphasis on the role of alien species // Topical Problems of Ecology and Environmental Protection. Tolyatti: VUiT, 2016. P. 81–86 (in Russian).

36. Rubanova M.V. Gelmints Perca *Persa fluviatilis* L., 1758 – agents of ichthyoparasitosis in the Saratov reservoir // Ecological problems of basins of large rivers – 6: Proceedings of the International Conference to the 35th anniversary of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences and the 65th anniversary of the Kuibevsky Bioinstation / Eds. G.S. Rosenberg, S.V. Saksonov. Tolyatti: Anna, 2018. P. 260–261 (in Russian).

37. Avakian A.B. Volga in the past, present and future. Moskva: Ekspress-ZM, 1998. 32 p. (in Russian).

38. Saliev R.N., Latypova V.Z., Saliev I.R. Ecological recovery and preservation of the unique water system of the Volga River: legislative issues // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 142–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-142-148

39. Izyumova N.A. Parasitofauna fish reservoirs of the USSR and ways of its formation. Leningrad: Nauka, 1977. 283 p. (in Russian).

40. Rubanova M.V. Possibilities of using the characteristic of parasitophauna rotan *Perccottus glenii* (Osteichthyes, Odontobutidae) for bioindication of the state of recipient water bodies // Voda: khimiya i ekologiya. 2013. No. 3 (57). P. 64–69 (in Russian).

УДК 528.72:004.93

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043

Изучение лесовосстановления на основе спутниковых снимков высокого разрешения

© 2021. Е. А. Домнина[1, 2], к. б. н., с. н. с., доцент,
Т. А. Адамович[1], к. г. н., доцент, А. С. Тимонов[1, 2], н. с., инженер,
Т. Я. Ашихмина[1, 2], д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
[1]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
[2]Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Для изучения и анализа процесса лесовосстановления в работе использованы спутниковые снимки высокого разрешения с аппарата WorldView-2 с пространственным разрешением 0,5–1,0 м, сделанные в период с 2007 по 2020 гг. и размещённые в открытом доступе на интернет ресурсе Google Earth Pro. Снимки выбраны на даты (конец весны – лето – начало осени), обеспечивающие анализ временного ряда в период наличия листвы на древесных растениях. Изучение лесовосстановления проводили в Оричевском районе Кировской области. Объекты исследований – участки рубок в лесных массивах.

Распознавание на снимках вырубок и стадий последующего лесовосстановления выполнялось методом визуального выявления прямых дешифровочных признаков: яркостные (фототон, цвет), геометрические (форма, тень, размер), структурные (текстура, структура, рисунок). Для идентификации выявленных по дешифровочным признакам объектов проведены полевые наблюдения.

Анализ временной серии космоснимков высокого разрешения в совокупности с полевыми наблюдениями на исследуемых участках позволил выявить характерные дешифровочные признаки для оценки отдельных стадий лесовосстановления. Это позволило реконструировать хронологию и степень зарастания вырубок древесно-кустарниковой и травянистой растительностью, а также оценить качество лесовосстановления. Наиболее информативными являются спутниковые снимки, сделанные в осенний период, когда листья изменили цвет, но не облетели, а также весенние снимки, когда снег уже сошёл, но ещё нет зелени от травянистых растений. Текстурный рисунок в совокупности с фототоном позволяет определить состояние лесных культур. На снимках отчётливо проявляется зарастание вырубок лиственными породами, поэтому есть возможность вовремя принять меры и получить насаждения с целевыми характеристиками. Результаты исследования можно использовать при переводе земель, предназначенных для лесовосстановления, в земли, занятые лесными насаждениями.

Предложенная в работе методика позволяет сделать оценку лесовосстановления, совершенствовать систему мониторинга лесных насаждений.

Ключевые слова: лесные насаждения, мониторинг воспроизводства лесов, космические снимки, лесовосстановление.

Reforestation study based on high resolution satellite imagery

© 2021. E. A. Domnina[1, 2] ORCID: 0000-0002-5063-8606, **T. A. Adamovich[1]** ORCID: 0000-0002-8684-927X,
A. S. Timonov[1, 2] ORCID: 0000-0001-8560-3051, **T. Ya. Ashikhmina[1, 2]** ORCID: 0000-0003-4919-0047,
[1]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[2]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: ttjnadamvich@rambler.ru

To study and analyze the reforestation process, we used high-resolution satellite images from the WorldView-2 apparatus with a spatial resolution of 0.5–1.0 m, made in the period from 2007 to 2020 and posted in the public domain on the Internet resource Google Earth Pro. The images were selected for dates (late spring – summer – early autumn), providing an analysis of the time series during the period of foliage on woody plants. The study of

reforestation was carried out in the Orichevsky district of the Kirov region. The objects of research are the felling areas in woodlands.

Recognition of clearings and stages of subsequent reforestation in the images was carried out by the method of visual identification of direct deciphering signs: brightness (phototone, color), geometric (shape, shadow, size), structural (texture, structure, pattern). At the same time, their change was analyzed within the same area in time, as well as taking into account the season of the year. Field observations were carried out to identify the objects revealed by decoding characteristics.

The analysis of a time series of high-resolution satellite images in conjunction with field observations in the studied areas made it possible to identify characteristic deciphering signs for assessing separate stages of reforestation. This made it possible to reconstruct the chronology and degree of overgrowing of felling areas with trees, shrubs and herbaceous vegetation, as well as to assess the quality of reforestation. The most informative are satellite images taken in the autumn, when the leaves changed color, but did not fly around, as well as spring images, when the snow has already melted, but there is still no greenery from herbaceous plants. The texture pattern in conjunction with the phototone allows you to determine the state of forest cultures. The images clearly show the overgrowth of clearings with deciduous species, so there is an opportunity to take timely measures and get plantings with target characteristics. The results of the study can be used when converting lands intended for reforestation into lands occupied by forest plantations.

The methodology proposed in the work makes it possible to assess reforestation quality, improve the monitoring system of forest plantations.

Keywords: forest plantations, monitoring of forest reproduction, satellite imagery, reforestation.

На протяжении длительного периода эксплуатации лесов на севере Русской равнины наблюдается повсеместная смена пород: сосна замещается елью и берёзой, ель – берёзой и осиной. Для предотвращения негативных последствий следует уделять пристальное внимание созданию и формированию насаждений с целевыми характеристиками на этапе лесовосстановления и формирования хвойных молодняков [1].

В последние десятилетия во всём мире дистанционный мониторинг за состоянием роста и продуктивности лесных насаждений является активно развивающейся областью научных исследований [2–5]. В первую очередь, это связано с широкой доступностью для учёных и специалистов спутниковых снимков среднего и высокого разрешений, а также быстро развивающимся рынком программных продуктов по работе с данными дистанционного зондирования.

Большой практический интерес у арендаторов леса и работников лесничеств вызывают тематические карты динамики роста молодняков искусственного и естественного происхождения, сделанные на основе разновременных спутниковых снимков [6–8]. Такие сведения позволяют отслеживать происходящие изменения, оценивать качество лесовосстановительных работ, планировать проведение лесохозяйственных мероприятий по уходу за молодыми насаждениями, а также совершенствовать прогнозы развития лесных ландшафтов и территорий [9].

Мониторинг воспроизводства лесов охватывает весь цикл лесохозяйственных мероприятий, начиная от мониторинга вырубок, лесных пожаров, ветровалов, а также других факторов и их последствий, вызывающих изменения в лесном покрове (деградации лесов), и заканчивая мониторингом лесовосстановления [11–15].

На вырубках осуществляется искусственное или естественное лесовосстановление с учётом действующих правил [16]. В последующем выделяют следующие этапы: оценка лесных насаждений, требующих лесовосстановления; перевод земель в лесопокрытую площадь при достижении древесными насаждениями определённых характеристик [16–18].

Спутниковый мониторинг позволяет оценивать восстановление лесов для перевода их в лесопокрытую площадь и для назначения в дальнейшем рубок ухода. Учитывая, с одной стороны, труднодоступность и масштабность вырубок, а с другой – необходимость контроля результативности (эффективности) лесовосстановительных работ, особенно актуальна разработка методов мониторинга и оценки лесовосстановления по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Целью работы является разработка методических подходов по оценке лесовосстановления с использованием спутниковых снимков высокого разрешения.

Материалы и методы исследования

Для анализа и оценки лесовосстановления использованы спутниковые снимки с космического аппарата WorldView-2 с пространственным разрешением 0,5–1,0 м, сделанные в период с 2007 по 2020 гг. и размещённые в открытом доступе на интернет ресурсе Google Earth Pro. Снимки выбраны на даты (конец

весны – лето – начало осени), обеспечивающие анализ временного ряда в период наличия листвы на древесных растениях [19].

Изучение лесовосстановления проводилось в подзоне южной тайги с преобладанием в растительном покрове сосновых и смешанных лесов. Объекты исследований – участки рубок в лесных массивах – выбраны исходя из наличия на эти территории разновременных спутниковых снимков высокого разрешения, охватывающих период лесовосстановления от 10 лет. Всего выбрано три участка, находящихся в Оричевском районе Кировской области.

Участок 1 расположен в сосновом лесу бруснично-зеленомошном. На участке зимой 2013 г. проведены чересполосные рубки шириной 35–38 м с оставленными невырубленными полосами такой же ширины.

Участок 2 – сосновый лес бруснично-зеленомошный, в котором имеются две вырубки: одна шириной порядка 90 м, другая – 140 м.

Участок 3 расположен в сосняке вейниково-разнотравном. На этом участке была проведена сплошная рубка в 2005–2006 гг.

Распознавание на снимках вырубок и стадий последующего их лесовосстановления выполнялось методом визуального выявления прямых дешифровочных признаков: яркостные (фототон, цвет), геометрические (форма, тень, размер), структурные (текстура, структура, рисунок). При этом анализировалось их изменение в пределах одного и того же участка во времени, а также с учётом сезона года.

Для идентификации выявленных по дешифровочным признакам объектов в мае 2021 г. проведены полевые наблюдения (заверка результатов дешифрирования). Они включали определение преобладающих видов растений и их состояние, которые, так или иначе, проявляются на снимках.

Результаты и обсуждение

Наиболее распространённым способом рубок в лесном хозяйстве России являются сплошные рубки, при которых происходит полное изъятие древостоя или сохраняются отдельные деревья. Важнейшим геометрическим признаком вырубок является наличие прямых углов (часто – вообще прямоугольная форма) [20]. В процессе лесовосстановления вырубки либо зарастают полезной древесной растительностью и через некоторое время перестают каким-либо образом выделяться среди окружающих участков леса, любо зарастают сорными (для леса) растениями (травянистыми, кустарниковыми и мелколиственными).

На серии разновременных спутниковых снимков участка 1 (рис. 1, см. цв. вкладку I) видно состояние растительного покрова до вырубки (рис. 1a) и динамика его зарастания после рубки в течение 9 лет (рис. 1b–f).

Вырубки дешифрируются по однородному светлому тону (цвету) и относительно гладкому текстурному рисунку.

На снимке от 04.07.2013 (рис. 1b) отчётливо наблюдаются плужные борозды в виде светлых параллельных полос с интервалом порядка 4–5 м. В дно плужных борозд в начале лета 2013 г. проведена посадка саженцев сосны. На снимке от 12.09.2014 (рис. 1c) хорошо виден однородный зелёный фон разросшихся травянистых растений с отчётливыми узкими следами борозд. На весенних снимках 2018 и 2020 гг. (рис. 1d, e) вырубки имеют общий светло-серый и желтоватый фототон; плужные полосы едва заметны. На снимке от 02.10.2020 г. (рис. 1f) также наблюдается общий зеленовато-бурый фототон, плужных полос и рядов растительности практически не видно; можно лишь заметить отдельные тёмные точки. На этом же снимке отчётливо выделяются ярко-жёлтые пятна.

При полевом обследовании в мае 2021 г. установлено, что вырубки заросли вейником и берёзой (рис. 2, см. цв. вкладку I), что и обусловливает общий зелёный тон на раннеосеннем снимке 2014 г. и светло-серый и желтоватый фон на весенних и осенних снимках 2018 и 2020 гг. Наблюдаемые отдельные тёмные точки на спутниковых снимках 2018 и 2020 гг. – это единичные 7–8-летние деревца сосны обыкновенной (рис. 2).

Источником семенного материала являются произрастающие рядом с вырубками отдельные старовозрастные берёзы и их группы, которые на осеннем снимке отчётливо выделяются жёлтыми пятнами среди тёмно-зелёных крон сосен (рис. 1f).

Саженцы, высаженные в дно борозд, оказались преимущественно ниже берёз. Осенью побеги вейника полегли на сеянцы, а после выпадения снега согнули их, придавили к земле и практически сделали в основной массе нежизнеспособными.

Анализ 10-летнего ряда спутниковых снимков показал, что исследуемые вырубки выделяются на общем тёмно-зелёном бугристом фоне леса очень светлыми участками с более-менее ровным текстурным рисунком (рис. 1f), почти не меняющимся во времени.

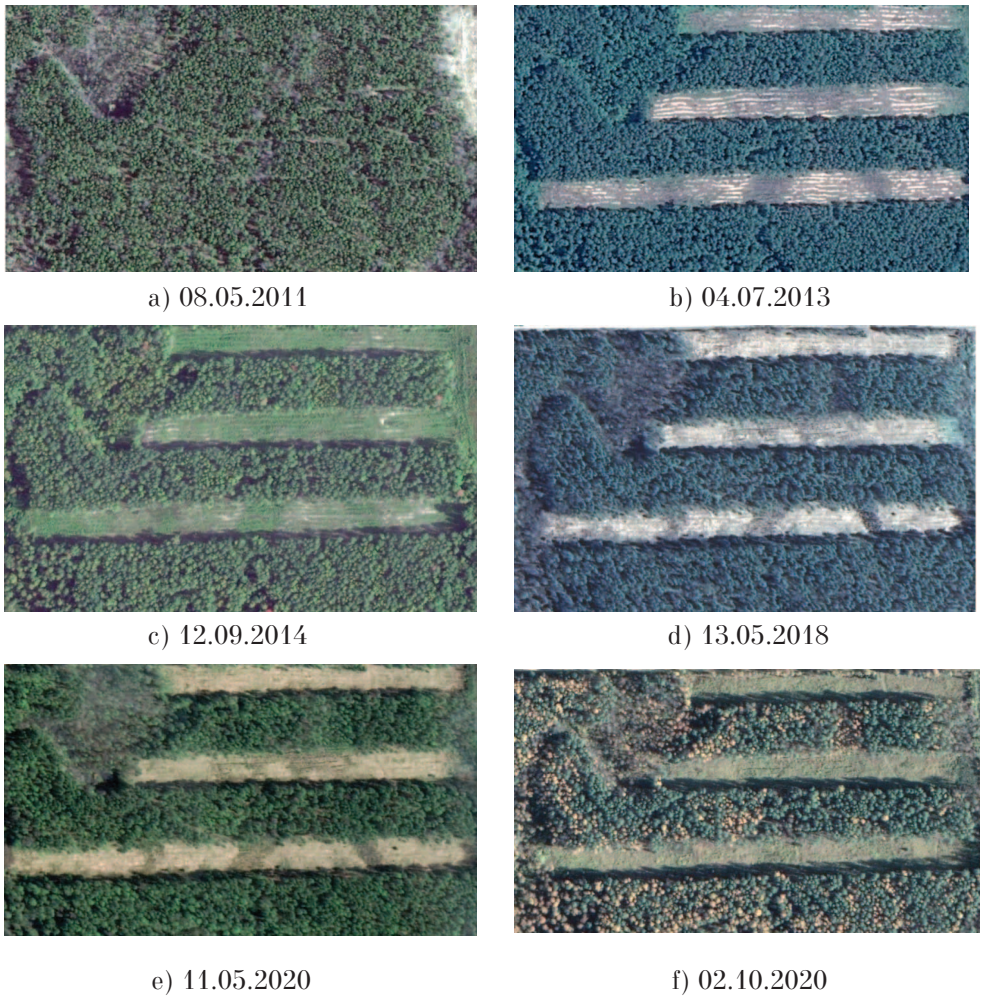


Рис. 1. Лесовосстановление на чересполосных рубках (участок 1)
Fig. 1. Reforestation in striped felling (site 1)

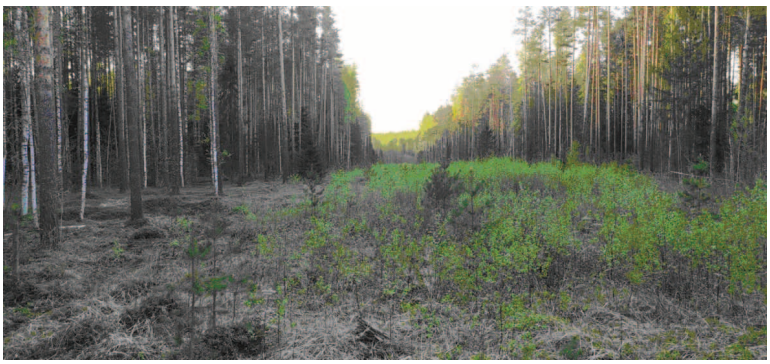
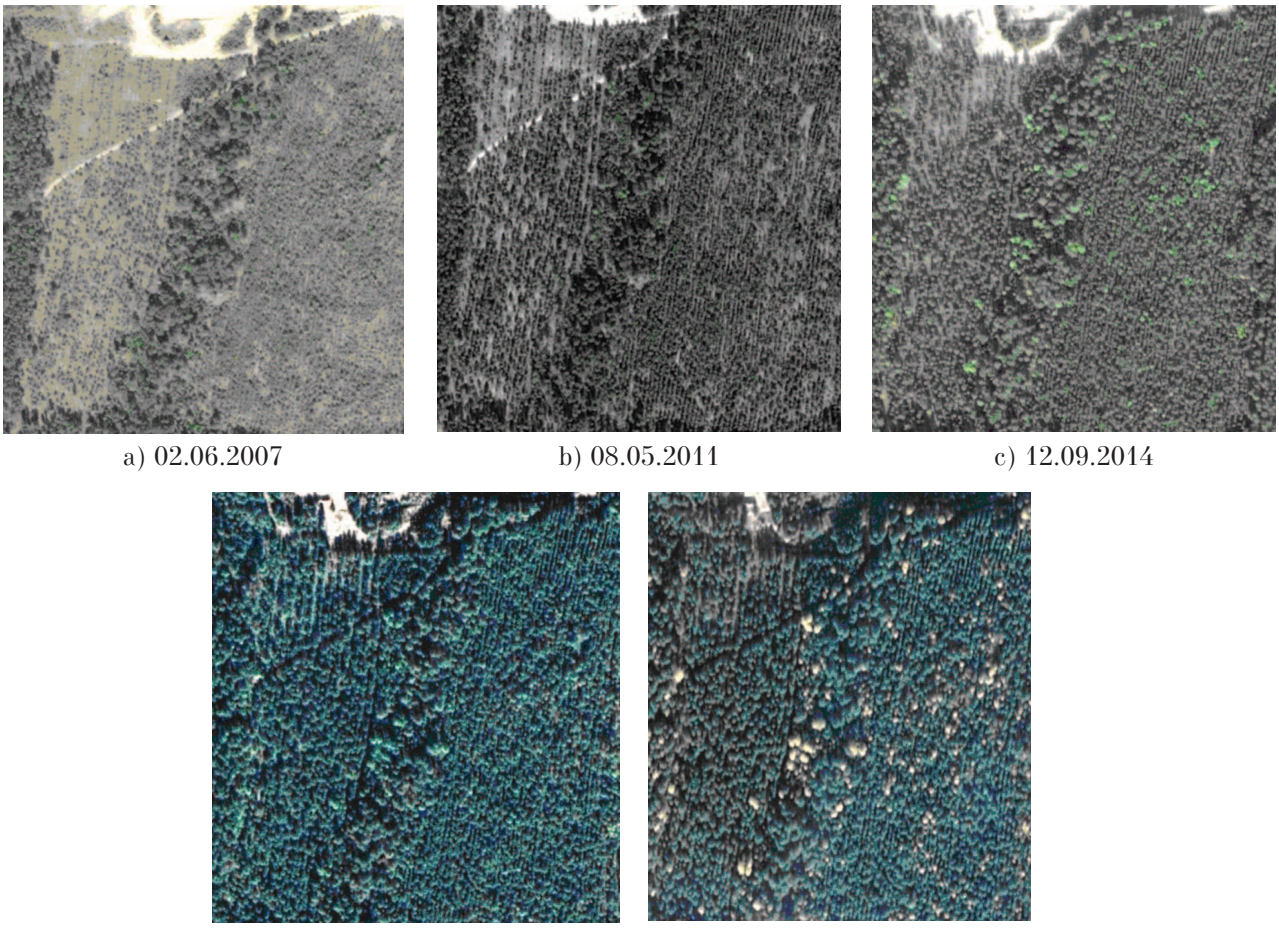


Рис. 2. Единичные 7–8-летние сосны в гуще берёз и вейника на участке 1 (май 2021 г.)
Fig. 2. Single 7–8-year-old pines in the thick of birches and herbaceous plants on site 1 (May 2021)

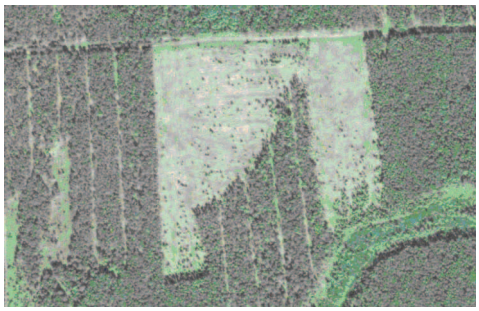


a) 02.06.2007 b) 08.05.2011 c) 12.09.2014

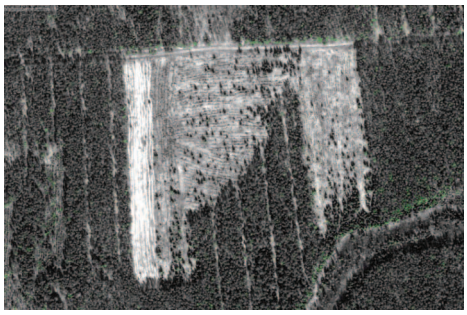
d) 10.09.2018 e) 29.09.2020

Рис. 3. Этапы лесовосстановления после сплошной рубки (участок 2)
Fig. 3. Different stages of reforestation after clear felling (site 2)

Рис. 4. Посадки сосны обыкновенной на участке 2 (май 2021 г.)
Fig. 4. Planting pine on site 2 (May 2021)

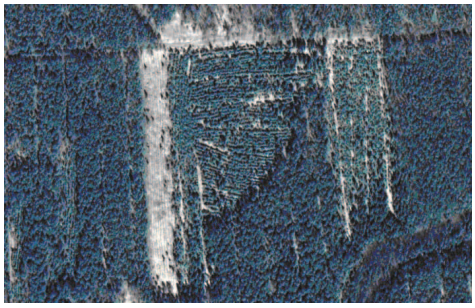


a) 02.06.2007

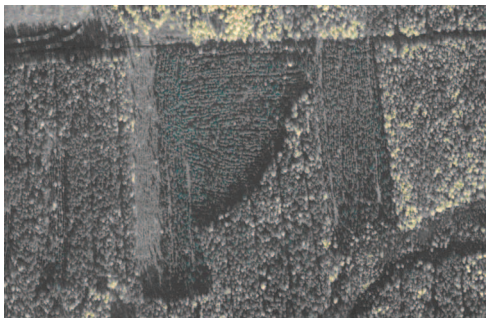


b) 08.05.2011

c) 04.07.2013



d) 13.05.2018



e) 29.09.2020

Рис. 5. Стадии лесовосстановления после сплошной рубки (участок 3)
Fig. 5. Reforestation stages after clear felling (site 3)

Рис. 6. Состояние лесовосстановления на дополнительной вырубке участка 3 (май 2021 г.)
Fig. 6. The state of reforestation at the additional felling site 3 (May 2021)

Видно также, что выделяющиеся на первых снимках борозды постепенно исчезают. Всё это свидетельствует об отсутствии ухода за лесными культурами [21].

Даже если посадка была проведена правильно и саженцы нормально прижились, то при отсутствии агротехнических уходов, которые должны обеспечивать защиту от конкурирующей и затеняющей травянистой растительности, а также быстрорастущих лиственных деревьев и кустарников, лесовосстановления должным образом не произошло.

Таким образом, по данным ДЗЗ и полевых наблюдений лесовосстановление на участке 1 можно считать неудовлетворительным.

На рисунке 3 (см. цв. вкладку II) представлены космоснимки участка 2, сделанные в период с 2007 по 2020 гг. Вырубки чётко видны на снимке 2007 г. (рис. 3a).

На спутниковых снимках 2007 и 2011 гг. (рис. 3a и 3b) хорошо прослеживаются борозды, которые отчётливо трассируются цепочками зелёных точек (рис. 3a). Это саженцы сосны. На рисунке 3b можно отметить смыкание этих точек (крон деревьев) в ряду, а на снимке 2011 г. (рис. 3c) заметно смыкание крон деревьев между рядами, что ориентировочно соответствует возрасту посадок, равному 14 лет. Участки вырубки, где саженцы погибли, отличаются однородным светло-зелёным цветом. Больше всего таких площадей на северо-западе участка. Однородный тёмно-зелёный тон древостоя на летних и раннеосенних космоснимках может приниматься как сформировавшийся на вырубке однородный массив сосны. Однако на позднеосеннем снимке (рис. 3e) на однородном тёмно-зелёном фототоне соснового древостоя наблюдаются единичные жёлтые пятна – кроны берёз.

Границы вырубки отличаются чёткостью даже после появления на них молодого леса и постепенно сглаживаются после 25-летнего возраста (рис. 3e).

Полевые наблюдения показали, что сосны на восстанавливающейся вырубке имеют возраст 25–26 лет. Рубки осветления, направленные на регулирование густоты древостоя и улучшение роста деревьев (предусмотренные в Приказе Минприроды России от 22 ноября 2017 г. № 626) здесь не проводились (рис. 4, см. цв. вкладку II).

В целом, лесовосстановление на данном участке можно характеризовать как удовлетворительное.

Анализ разновременных космических снимков участка 3 (рис. 5, см. цв. вкладку III) позволяет установить динамику зарастания сплошной рубки, которая была проведена в 2005–2006 гг. Границы вырубки так же, как и на участке 2, остаются заметными даже после появления на них молодого леса.

На снимках 2007–2013 г. (рис. 5a, b, c) отчётливо наблюдаются параллельные полосы с расстоянием 4–5 м субмеридионального (в западной и восточной частях) и субширотного (в центральной части) направлений, а также отдельные тёмные точки, расположенные более-менее равномерно или группами. На местности первые представлены бороздами, в которые произведена посадка саженцев сосны, а вторые – отдельными взрослыми соснами или куртинами деревьев, выполняющими роль обсеменителей для содействия естественному лесовозобновлению.

На снимке 2013 г. (рис. 5c) видны цепочки зелёных точек по бороздам, сливающихся в отдельных местах в линию. Эти точки на местности представлены кронами молодых деревьев, а линии – участками сомкнутых крон. На снимке 2018 г. (рис. 5d) отмечаются тёмно-зелёные бугристые полосы, что указывает на смыкание крон молодых деревьев в ряду, а на снимке 2020 г. (рис. 5e) – смыкание крон деревьев между рядами. На этом же снимке, как и на снимках ранее описанных участков (2020 г.), среди лесного массива чётко видны отдельные жёлтые пятна или группы пятен. При полевых наблюдениях установлено, что это лиственные деревья: берёзы и осины. Причём в насаждениях их практически нет.

В целом с момента проведения вырубки в 2005–2006 гг. и за период до 2020 г. на изучаемой территории практически сформировался монодоминантный древесный покров.

На космоснимке 2011 г. (рис. 5b) в западной части вырубки отчётливо видна светлая полоса шириной порядка 40 м (которая отсутствует на снимке 2007 г.). Это новая вырубка, непосредственно примыкающая к основной. На снимке (рис. 5b) наблюдаются белые субпараллельные полосы с интервалом 3,5–5 м и единичные чётко выраженные точки. Первые – это нарезанные борозды, сделанные при проведении мероприятий по искусственному лесовосстановлению, а вторые – одиночные деревья сосны (семенники), оставленные для содействия естественному лесовосстановлению.

Анализ космоснимков 2013–2020 гг. (рис. 5c, d, e) свидетельствует о том, что эта вырубка практически не меняет своего облика ни по общему текстурному рисунку, ни по

общему равномерному фототону, за исключением того, что борозды становятся всё менее заметными. Общий вид разновозрастного ряда спутниковых снимков этой части территории аналогичен таковому на участке 1.

При полевом обследовании в мае 2021 г. установлено, что вырубка на участке 3 заросла берёзой и травянистой растительностью (преимущественно вейником) (рис. 6, см. цв. вкладку III), хотя в бороздах имеются единичные сосны возрастом 5–7 лет и ели.

Следовательно, на этой части вырубки, как и на вырубке участка 1, лесовосстановление прошло неудовлетворительно.

Анализ временной серии спутниковых снимков с космических аппаратов позволил детально реконструировать хронологию зарастания вырубок на участках 1–3 древесно-кустарниковой растительностью и выявить отдельные стадии этого процесса.

Состав возобновления вырубок на цветных космических снимках определяется по цветовому тону. Особенно контрастно это видно на осенних снимках, удачно сделанных в определённую фенофазу (листья пожелтели, но ещё не опали), когда хвойные породы имеют тёмно-зелёный цвет, а лиственные – от жёлтого до оранжевого (рис. 1f, 3e, 5e). Другим индикатором пространственно-временной неоднородности протекания сукцессии за период дистанционного мониторинга является динамика плотности деревьев на исследуемом участке. Участки вырубок на снимках дешифрируются достаточно хорошо, так же, как и площади вырубок с созданными на них лесными культурами.

Оценка качества, эффективности достигнутого уровня лесовосстановления осуществляется в течение довольно длительного периода – от создания лесных культур и проведения мер содействия естественному возобновлению, перевода молодняков в покрытые лесной растительностью земли лесного фонда до рубки леса в возрасте спелости. Наиболее уязвимым для процесса лесовосстановления является этап молодняков, продолжающийся со времени посадки до 10-летнего возраста. Именно в этот период необходимо проводить работы по уходу за молодняками с одновременным осуществлением дистанционного мониторинга на основе спутниковых снимков сверхвысокого разрешения.

Заключение

Анализ временной серии космоснимков сверхвысокого разрешения, находящихся в открытом доступе, в совокупности с единичными полевыми наблюдениями на исследуемых участках позволил выявить характерные дешифровочные признаки для оценки отдельных стадий лесовосстановления. Это, в свою очередь, дало возможность реконструировать хронологию и выявить динамику степени зарастания вырубок древесно-кустарниковой и травянистой растительностью и оценить качество лесовосстановления.

Спутниковые снимки являются прогрессивным способом и неотъемлемым этапом для мониторинга лесных угодий. Районы, где активно ведутся рубки леса, хорошо заметны на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения (0,5–1,0 м) по мозаичности лесного полога, его текстурному рисунку и фототону. Наиболее информативными являются космоснимки, сделанные в период, когда листья изменили цвет, но не облетели (осенние снимки), и когда ещё нет зелени от травянистых растений, а снег уже в основном сошёл (весенние снимки). Текстурный рисунок в совокупности с фототоном позволяет определить состояние лесных культур.

На снимках отчётливо можно определить зарастание вырубок лиственными породами, поэтому есть возможность вовремя принять меры и получить данные о насаждениях с целевыми характеристиками. Результаты исследования можно использовать при переводе земель, предназначенных для лесовосстановления, в земли, занятые лесными насаждениями.

Использование данной методики может быть ограничено наличием космических снимков на участки лесного фонда, так как обновление базы космоснимков зачастую отстаёт от лесозаготовительной деятельности.

В целом, применение методики оценки лесовосстановления с использованием спутниковых снимков высокого разрешения позволяет принять своевременные меры по лесовосстановлению, в особенности на этапе развития молодняков, а также совершенствовать систему мониторинга лесных насаждений.

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

References

1. Sungurova N.G. Theory and practice of artificial reforestation in the north of the Russian Plain: Abstract

dissertation. doct. agricultural sciences. Arkhangelsk, 2018. 42 p. (in Russian).

2. Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobiev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Miftakhov T.F., Nezamaev S.A., Polevshchikova Yu.A. Remote monitoring of dynamics violations of forest cover, reforestation and reforestation in the Mari Trans-Volga region // Vestnik MarGTU. 2011. No. 3. P. 17–24 (in Russian).

3. Shimov S.V., Nikitina Yu.V. Technology for monitoring deforestation using satellite images of high spatial resolution // Geomatika. 2011. No. 3. P. 47–52 (in Russian).

4. Dandois J.P., Ellis E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 136. P. 259–276. doi: 10.1016/j.rse.2013.04.005

5. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21st century forest cover change // Science. 2013. No. 342 (6160). P. 850–853. doi: 10.1126/science.1244693

6. Nilson T. Age dependence on forest reflectance: analysis of main driving factors // Remote Sensing of Environment. 1994. No. 48. P. 319–331.

7. Isaeva A.S. Monitoring the biological diversity of Russian forests: methodology and methods. Moskva: Nauka, 2008. 453 p. (in Russian).

8. Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.Yu., Chernenkova T.V. Using satellite data to monitor forest biodiversity // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2009. No. 2. P. 1–12 (in Russian).

9. Krylov A.M., Vladimirova N.A. Remote monitoring of forest condition based on satellite imagery data // Geomatika. 2011. No. 1. P. 53–57 (in Russian).

10. Medvedev A.A., Telnova N.O., Kudikov A.V. Remote highly detailed monitoring of the dynamics of overgrowing of abandoned agricultural lands with forest vegetation // Voprosy lesnoy nauki. 2019. V. 2 (3). P. 1–12 (in Russian). doi: 10.31509/2658-607x-2020-3-1-1-8

11. Zlenko L.V., Koshurnikova N.N., Zhuikov A.V. Reforestation processes in felling areas and burnt-out areas // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 5 [Internet resource] http://science-education.ru/ru/article/view?id=22449 (Accessed: 23.04.2021) (in Russian).

12. Tsvetkov V.F. Etudes of forest ecology. Arhangel'sk: AGTU, 2009. 354 p. (in Russian).

13. Vorobiev O.N., Vorobiev E.A. Remote monitoring of the regenerative dynamics of vegetation in the burned-out areas of the Mari forest Trans-Volga region // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. No. 14 (2). P. 84–97 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97

14. Terekhin E.A., Chendev Yu.G. Assessment of changes in forest cover in the modern period in the south of the Central Russian Upland using materials from space surveys of different times // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. No. 3. P. 114–126 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-114-126

15. Karpov A.A., Bogdanov A.P., Pirtskhalava-Karpova N.R., Demina N.A. The use of remote sensing data for monitoring reforestation in boreal forests // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2019. V. 229. P. 23–43 (in Russian).

16. Rules of reforestation: approved. Order of the Ministry of Nature of Russia dated 04.12.2020. No. 1014 (in Russian).

17. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Use of survey materials in assessing the regenerative dynamics of forests in flat areas // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2011. V. 8. No. 2. P. 208–216 (in Russian).

18. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Ecological and dynamic study of the forest formation process using satellite images // Lesovedenie. 2013. No. 5. P. 76–85 (in Russian).

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

20. Shikhov A.N. Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. Thematic decryption and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution. Perm, 2020 [Internet resource] http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskih-snimkov.pdf (Accessed: 23.04.2021) (in Russian).

УДК 544.723 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-044-051

Оценка эффективности сорбции ионов свинца(II) с помощью моделей кинетики и изотермы сорбции

© 2021. С. Г. Скугорева[1], к. б. н., н. с., Г. Я. Кантор[1, 2], к. т. н., н. с., Л. И. Домрачева[1, 3], д. б. н., профессор,
[1]Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
[2]Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
[3]Вятский государственный агротехнологический университет, 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
e-mail: skugoreva@mail.ru, grigory_kantor@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Целью работы было оценить эффективность использования сорбентов различной природы (активированный уголь, цеолит, торф, мицелий *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., цианобактерия *Nostoc paludosum* Kütz., биоплёнки с доминированием *N. commune*, листья ярового ячменя *Hordeum distichum* L.) по отношению к ионам свинца(II) с использованием моделей кинетики и изотермы сорбции. Установлено, что изотерму сорбции ионов свинца(II) большинством сорбентов хорошо описывает уравнение Фрейндлиха (r^2 = 0,61–0,993), которое предполагает неограниченную адсорбцию, а кинетику сорбции – уравнение модифицированной модели второго порядка (r^2 = 0,90–0,9993), основанной на том, что процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена и предполагает, что в начальный момент времени адсорбция не равна нулю. Согласно данным моделям, наиболее эффективными сорбентами ионов свинца(II) являются листья растений ячменя и торф, наименее – активированный уголь и цеолит. Сорбенты на основе сухой биомассы микроорганизмов и их биоплёнок имеют среднюю эффективность.

Ключевые слова: сорбция, биосорбенты, ячмень, торф, биоплёнки *Nostoc commune*, *Fusarium culmorum*, *Nostoc paludosum*, кинетика сорбции, изотерма сорбции, ионы свинца(II).

Evaluation of the sorption efficiency of lead(II) ions using models of kinetics and sorption isotherm

© 2021. S. G. Skugoreva[1] ORCID: 0000-0002-5902-5187,
G. Ya. Kantor[1, 2] ORCID: 0000-0002-6462-6702,
L. I. Domracheva[1, 3] ORCID: 0000-0002-7104-3337,
[1]Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
[2]Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[3]Vyatka State Agrotechnological University, 133, Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,
e-mail: skugoreva@mail.ru, grigory_kantor@mail.ru, dli-alga@mail.ru

The aim of this work was to evaluate the efficiency of using sorbents of different nature (activated carbon, zeolite, peat, mycelium of *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., cyanobacterium *Nostoc paludosum* Kütz., biofilms dominated by *N. commune*, leaves of spring barley *Hordeum distichum* L.) with respect to lead(II) ions using models of kinetics and sorption isotherm. It was found that the isotherm of sorption of lead(II) ions by most sorbents is well described by the Freundlich equation (r^2 = 0.61–0.993), which assumes unlimited adsorption, and the kinetics of sorption is the equation of a modified second-order model (r^2 = 0.90–0.9993), based on the fact that the sorption process is limited by the ion exchange reaction and assumes that at the initial moment of time the adsorption is not equal to zero.

In the course of the study, a series of sorbents were built in descending order of sorption capacity in relation to lead ions: according to the kinetic model equation: barley ≥ peat > biofilms *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* >

activated carbon > zeolite; according to the sorption isotherm equation: barley > peat > biofilms *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > activated carbon > zeolite.

Thus, the series of sorbents obtained in the description of sorption by the model of sorption kinetics and isotherm completely coincide. The most effective sorbents of lead(II) ions are barley leaves and peat, the least – activated carbon and zeolite. Sorbents based on dry biomass of microorganisms and their biofilms have an ntermediate efficiency.

Keywords: sorption, biosorbents, barley, peat, biofilms of *Nostoc commune*, *Fusarium culmorum*, *Nostoc paludosum*, sorption kinetics, sorption isotherm, lead(II) ions.

В настоящее время всё бóльшую актуальность приобретает проблема загрязнения окружающей среды соединениями тяжёлых металлов (ТМ) в связи с их высокой токсичностью, способностью к аккумуляции в живых организмах и устойчивостью [1]. Одним из самых токсичных ТМ является свинец, его ПДК в воде составляет 0,01 мг/л, в почве – 32 мг/кг (СанПин 1.2.3685-21). Поступление избыточных концентраций соединений свинца в организм человека может приводить к заболеваниям центральной нервной и репродуктивной систем, мозга, печени, почек [2].

Наиболее эффективным способом извлечения ТМ из загрязнённых сточных вод и почв является сорбция. Среди сорбционных методов зачастую предпочтение отдаётся биосорбции, которая основана на использовании в качестве сорбентов растений, грибов и различных групп микроорганизмов. Считается, что это наиболее экологически чистая и безопасная технология очистки вод и почв от ТМ [3].

При описании процесса сорбции многие исследователи используют различные математические модели. При этом одни авторы описывают изотерму сорбции, которая представляет собой зависимость количества адсорбированного вещества от концентрации раствора в равновесных условиях. Другие авторы делают акцент на кинетике сорбции, которая отражает зависимость количества адсорбированного вещества от времени процесса в условиях, далёких от равновесных. Тем не менее, в научной литературе есть единичные публикации [4, 5], в которых одновременно при изучении сорбции использовались модели изотермы сорбции и модели кинетики сорбции. Следует отметить, что процесс сорбции является единым процессом, поэтому его изучение с использованием и моделей кинетики, и изотермы сорбции является важным для понимания механизма процесса, подбора наиболее эффективных сорбентов и оптимальных условий проведения сорбции.

Использование потенциометрического метода позволяет в режиме реального времени строить кривые кинетики сорбции ионов ТМ различными сорбентами, проводить их обработку и сравнить эффективность сорбентов [6, 7].

Ранее нами была дана оценка эффективности сорбентов различной природы по отношению к ионам меди(II) [6]. Наиболее эффективными сорбентами оказались растения ячменя, которые обладали максимальной скоростью сорбции и высокой сорбционной ёмкостью.

Цель работы: оценить эффективность использования сорбентов различной природы по отношению к ионам свинца(II) с использованием моделей кинетики и изотермы сорбции.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования в качестве сорбентов использовали [6]: активированный уголь (ЗАО «Медисорб»); природный цеолит сокирнит 1 типа (ООО «Цео-Макс»); торф из месторождения вблизи с. Чистополье (Котельничский район Кировской области); мицелий гриба *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.; культуру почвенной цианобактерии (ЦБ) *Nostoc paludosum* Kütz. № 18; природные биоплёнки (БП) с доминированием *Noctoc commune* [8]; среднюю часть третьего листа 25-дневных растений ярового ячменя (*Hordeum distichum* L.) сорта Новичок.

Мицелий микромицета и биомассу ЦБ предварительно отмывали от питательной среды, БП *N. commune* – от частиц почвы дистиллированной водой. Все сорбенты высушивали до постоянной массы, измельчали. Измерение содержания ионов свинца(II) в растворе проводили потенциометрическим методом на иономере «Эксперт-001» при температуре 23 °С.

В стакан наливали 50 мл раствора нитрата свинца(II) с концентрациями $0{,}8 \cdot 10^{-4}$; $1{,}6 \cdot 10^{-4}$; $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-4}$ моль/л (М), погружали в раствор магнит, ионоселективный электрод и двухключевой электрод сравнения, включали магнитную мешалку [6]. Запускали программу приёма и обработки данных с иономера EXP2PR (ООО «ЭКОНИКС-ЭКСПЕРТ»). Пробы сухих сорбентов (масса сорбента 50 мг) вносили в стакан с раствором соли свинца.

Для оценки эффективности сорбентов использовали: модели кинетики (псевдо-первого и псевдо-второго порядков, модифицированную модель второго порядка и модель Еловича [6, 9, 10]), уравнения изотерм сорбции (Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича [11–13]).

Значения параметров кинетических моделей и изотерм сорбции, усреднённые за полное время каждого измерения, находили методом наименьших квадратов при помощи надстройки «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel. При подборе уравнения изотермы сорбции и модели кинетики рассчитывали коэффициент детерминации r^2 по формуле:

$$r^2 = 1 - \frac{D_1}{D_2}, \quad (1)$$

где D_1 – дисперсия разности экспериментальных и расчётных данных; D_2 – дисперсия экспериментальных данных.

Результаты и их обсуждение

Кинетика сорбции. Для установления модели, оптимально описывающей сорбцию ионов свинца(II) сорбентами, сравнивали коэффициенты детерминации r^2 (табл. 1).

В большинстве случаев сорбцию ионов свинца(II) *F. culmorum* наилучшим образом описывает модифицированная модель

Таблица 1 / Table 1

Результаты обработки (r^2) кинетических кривых сорбции Pb^{2+}моделями химической кинетики
The results of processing (r^2) of the kinetic curves of sorption of Pb^{2+} models of chemical kinetics

Сорбент Sorbent	Модель псевдо-первого порядка Pseudo-first order model	Модель псевдо-второго порядка Pseudo-second order model	Модифицированная модель второго порядка Modified second order model	Модель Еловича Elovich's model
$0{,}8 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
F. culmorum	0,91	0,999**	0,999**	0,64
N. paludosum	0,97	0,98**	0,98**	0,72
Биоплёнки / Biofilms	0,997**	0,99*	0,99*	0,93
Цеолит / Zeolite	0,92	0,98	0,99*	0,996**
$1{,}6 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
F. culmorum	0,92	0,997*	0,998**	0,91
N. paludosum	0,992**	0,99*	0,99*	0,93
Биоплёнки / Biofilms	0,992**	0,98*	0,98*	0,95
Ячмень / Barley	0,98**	0,94*	0,94*	0,42
Торф / Peat	0,997**	0,94*	0,94*	0,47
АУ / AC	0,87	0,96	0,99*	0,993**
Цеолит / Zeolite	0,90	0,95	0,99**	0,99*
$3{,}2 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
F. culmorum	0,87	0,96*	0,97**	0,86
N. paludosum	0,78	0,96*	0,98**	0,94
Биоплёнки / Biofilms	0,98	0,997**	0,997**	0,94
Ячмень / Barley	0,94	0,99**	0,99**	0,62
Торф / Peat	0,97	0,98**	0,98**	0,73
АУ / AC	0,81	0,92	0,97*	0,99**
Цеолит / Zeolite	0,90	0,94	0,98**	0,98*
$8 \cdot 10^{-4}$ моль/л / mol/L $Pb(NO_3)_2$				
F. culmorum	0,55	0,84	0,90*	0,94**
N. paludosum	0,88	0,97	0,99*	0,997**
Биоплёнки / Biofilms	0,99	0,9993**	0,9993**	0,98
Ячмень / Barley	0,76	0,96*	0,98**	0,86
Торф / Peat	0,98	0,99**	0,99**	0,83

*Примечание: АУ – активированный уголь; * – высокие значения; ** – максимальные значения.*
*Note: AC – activated carbon; * – high values; ** – maximum values.*

второго порядка. Лишь при самой высокой концентрации нитрата свинца в растворе ($8 \cdot 10^{-4}$ М) наиболее приемлемой оказалась модель Еловича.

Для ЦБ *N. paludosum* применимость моделей сорбции ионов свинца зависела от начальной концентрации ионов свинца. Так, при $0{,}8 \cdot 10^{-4}$ и $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ М процесс хорошо описывает уравнение модифицированной модели второго порядка, при $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ М – модель псевдо-первого порядка, при $8 \cdot 10^{-4}$М – модель Еловича.

Сорбция свинца БП с доминированием *N. commune* при низких концентрациях ионов в растворе ($0{,}8 \cdot 10^{-4}$ и $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ М) адекватно описывает модель псевдо-первого порядка, при более высоких концентрациях ($3{,}2 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-4}$ М) – модель псевдо-второго и модифицированная модель второго порядка.

Для характеристики сорбции свинца листьями растений ячменя и торфом в большинстве случаев наиболее оптимально использование уравнения модифицированной модели второго порядка. Однако при концентрации нитрата свинца $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ М отмечаются максимальные значения коэффициента детерминации для уравнения псевдо-первого порядка.

Для активированного угля процесс сорбции наилучшим образом описывает модель Еловича. Высокие значения по данной модели отмечаются и для другого неорганического сорбента – цеолита, хотя максимальные значения r^2 отмечаются для модели модифицированного второго порядка. Полученные данные свидетельствуют о том, что поверхность данных сорбентов не является однородной.

Таким образом, для описания кинетики сорбции ионов свинца большей частью сорбентов наиболее приемлемой оказалась модифицированная модель второго порядка (r^2 = 0,90–0,9993). Данная модель предполагает, что процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена, сорбат и функциональная группа сорбента взаимодействуют между собой в соотношении 1 : 1 [9].

В основе модифицированной модели второго порядка лежит уравнение:

$$a_t = a_e \cdot \left(1 - \frac{1}{b + k_2' t}\right), \qquad (2)$$

где a_t и a_e – удельная и равновесная (предельная) удельная масса сорбата соответственно (ммоль/г или мг/г), k_2' – константа скорости сорбции модифицированной модели второго порядка (c^{-1}), b – поправочный коэффициент.

Скорость сорбции ионов свинца(II) сорбентом возрастает с ростом значений кинетического коэффициента (k_2'); сорбционная ёмкость – с увеличением равновесной (предельной) удельной массы сорбата (a_e). Модифицированная модель второго порядка учитывает то, что адсорбция в начальный момент времени происходит мгновенно, поэтому она не равна нулю, в связи с чем вводится поправочный коэффициент b ($b \geq 1$):

$$b = \frac{1}{1 - \theta_0}. \qquad (3)$$

Исходя из значений b, рассчитывали начальное покрытие поверхности сорбента Θ_0, которое равно отношению a_0/a_e [10]. Параметры модели модифицированного второго порядка для сорбентов при различных начальных концентрациях нитрата свинца(II) в растворе представлены в таблице 2.

Судя по кинетическому коэффициенту, высочайшей скоростью сорбции обладали листья ячменя, на порядок меньше была скорость сорбции для торфа. Средними значениями скоростей характеризовались сухая биомасса микромицета *F. culmorum* и цианобактерии *N. paludosum*. Относительно низкие значения кинетического коэффициента k_2' получены для активированного угля, цеолита и БП.

Между кинетическим коэффициентом и начальной концентрацией ионов свинца в растворе существует обратная корреляционная зависимость, сила которой была достаточно высока для растений ячменя (r = -0,999), торфа (r = -0,996) и цеолита (r = -0,95). Для остальных сорбентов коэффициент корреляции варьировал в пределах от -0,67 до -0,61. Отрицательные значения коэффициента корреляции означают, что с увеличением начальной концентрации ионов свинца в растворе относительная скорость сорбции снижается.

Полученные значения равновесной удельной массы сорбата свидетельствуют о высокой сорбционной ёмкости листьев растений ячменя и торфа, средних ёмкостях ЦБ и БП. Несколько ниже была ёмкость для биомассы *F. culmorum* как сорбента ионов свинца. При этом полученное значение ёмкости сорбции данным видом фузариума (0,098 ммоль/г) хорошо согласуются с ранее полученным значением (0,099 ммоль/г) [14]. Низкими значениями показателя характеризовались цеолит и активированный уголь. Для всех сорбентов

Таблица 2 / Table 2

Параметры модифицированной модели сорбции второго порядка для сорбентов при разных начальных концентрациях ионов свинца в растворе
Parameters of the modified second-order model of sorption for sorbents at different initial concentrations of lead ions in solution

Начальная концентрация Initial concentration $Pb(NO_3)_2$, моль/л / mol/L	Сорбент Sorbent	k_2', $\cdot 10^{-3}$ с$^{-1}$	a_e, мг/г сорбента mg/g sorbent	b	Θ_0
$0{,}8 \cdot 10^{-4}$	*F. culmorum*	66,06	16,28	1,0000	0,0000
	N. paludosum	31,98	16,81	1,0000	0,0000
	биоплёнки / biofilms	2,20	17,92	1,0000	0,0000
	цеолит / zeolite	3,35	12,11	1,1706	0,1458
$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	*F. culmorum*	9,28	29,00	1,0690	0,0646
	N. paludosum	4,91	35,93	1,0000	0,0000
	биоплёнки / biofilms	1,18	39,18	1,0000	0,0000
	ячмень / barley	278,91	31,11	1,0000	0,0000
	торф / peat	22,76	33,07	1,0000	0,0000
	АУ / AC	2,87	26,76	1,2439	0,1961
	цеолит / zeolite	1,97	16,22	1,2227	0,1822
$3{,}2 \cdot 10^{-4}$	*F. culmorum*	12,18	42,37	1,0980	0,0893
	N. paludosum	3,16	60,89	1,2739	0,2150
	биоплёнки / biofilms	3,40	63,39	1,0000	0,0000
	ячмень / barley	202,92	68,97	1,0000	0,0000
	торф / peat	16,29	67,64	1,0000	0,0000
	АУ / AC	5,22	29,37	1,3288	0,2475
	цеолит / zeolite	1,09	26,49	1,1971	0,1646
$8 \cdot 10^{-4}$	*F. culmorum*	4,52	61,13	1,6859	0,4068
	N. paludosum	1,64	94,69	1,1964	0,1642
	биоплёнки / biofilms	1,00	107,55	1,0000	0,0000
	торф / peat	3,48	165,83	1,0000	0,0000

Примечание / Note: АУ – активированный уголь / AC – activated carbon.

установлена высокая корреляционная связь между равновесной удельной массой сорбата и начальной концентрацией ионов свинца в растворе: r = 0,96–0,9999, т. е. с увеличением начальной концентрации ионов свинца в растворе сорбционная ёмкость всех сорбентов увеличивается.

Ранее, при исследовании сорбции ионов меди(II) этими же сорбентами, показано [6], что кинетика процесса также, как и для ионов свинца, хорошо описывается моделью псевдо-второго порядка и модифицированной моделью второго порядка. Ряд сорбентов по снижению сорбционной ёмкости ионов меди имел тот же вид, что и для свинца. Абсолютные значения равновесной удельной массы для меди составляли 0,16–0,32, для свинца – 0,017–0,049 ммоль/г сорбента, что на порядок меньше. Таким образом, исследуемые сорбенты лучше сорбируют ионы меди, чем ионы свинца.

Для цеолита и активированного угля, а также фузариума и ЦБ при относительно высоких начальных концентрациях ионов свинца в растворе коэффициент b был больше единицы, начальное покрытие сорбатом поверхности сорбента Θ_0 составляло от 6,50 до 40,68% от предельной удельной массы сорбата. Это означает, что в начальный момент времени адсорбция ионов свинца из раствора не равна нулю, поэтому в данных случаях наиболее приемлемо уравнение модифицированной модели второго порядка, а не псевдо-второго порядка.

Изотермы сорбции. Равновесие в адсорбционной системе зависит от природы взаимодействия адсорбент – адсорбат. Изотермы адсорбции описывают это взаимодействие по-разному [15]. Модель Ленгмюра хорошо описывает адсорбцию на мономолекулярном слое, модель Фрейндлиха – неограниченную адсорбцию на гетерогенных поверхностях

Таблица 3 / Table 3

Результаты обработки (r^2) сорбции ионов свинца уравнениями изотермы адсорбции
Results of processing (r^2) sorption of lead ions by equations of adsorption isotherm

Сорбент / Sorbent	Уравнение Ленгмюра Langmuir's equation	Уравнение Фрейндлиха Freundlich's equation	Уравнение Дубинина-Радушкевича Dubinin-Radushkevich's equation
F. culmorum	0,94*	0,993**	0,76
N. paludosum	0,80*	0,94**	0,80
Биоплёнки / Biofilms	0,95*	0,97**	0,45
Торф / Peat	0,998*	0,97	0,9996**
Цеолит / Zeolite	0,39	0,61**	0,31

*Примечание: * – высокие значения, ** – максимальные значения.*
*Note: * – high values, ** – maximum values.*

Таблица 4 / Table 4

Параметры модели Фрейндлиха для различных сорбентов
Freundlich model parameters for various sorbents

Сорбент / Sorbent	K_F, л/мг / L/mg	*1/n*
Ячмень / Barley	110,45	0,248
Торф / Peat	100,11	0,198
N. paludosum	47,21	0,152
Биоплёнки / Biofilms	37,98	0,225
F. culmorum	20,52	0,262
Активированный уголь / Activated carbon	17,70	0,172
Цеолит / Zeolite	9,14	0,300

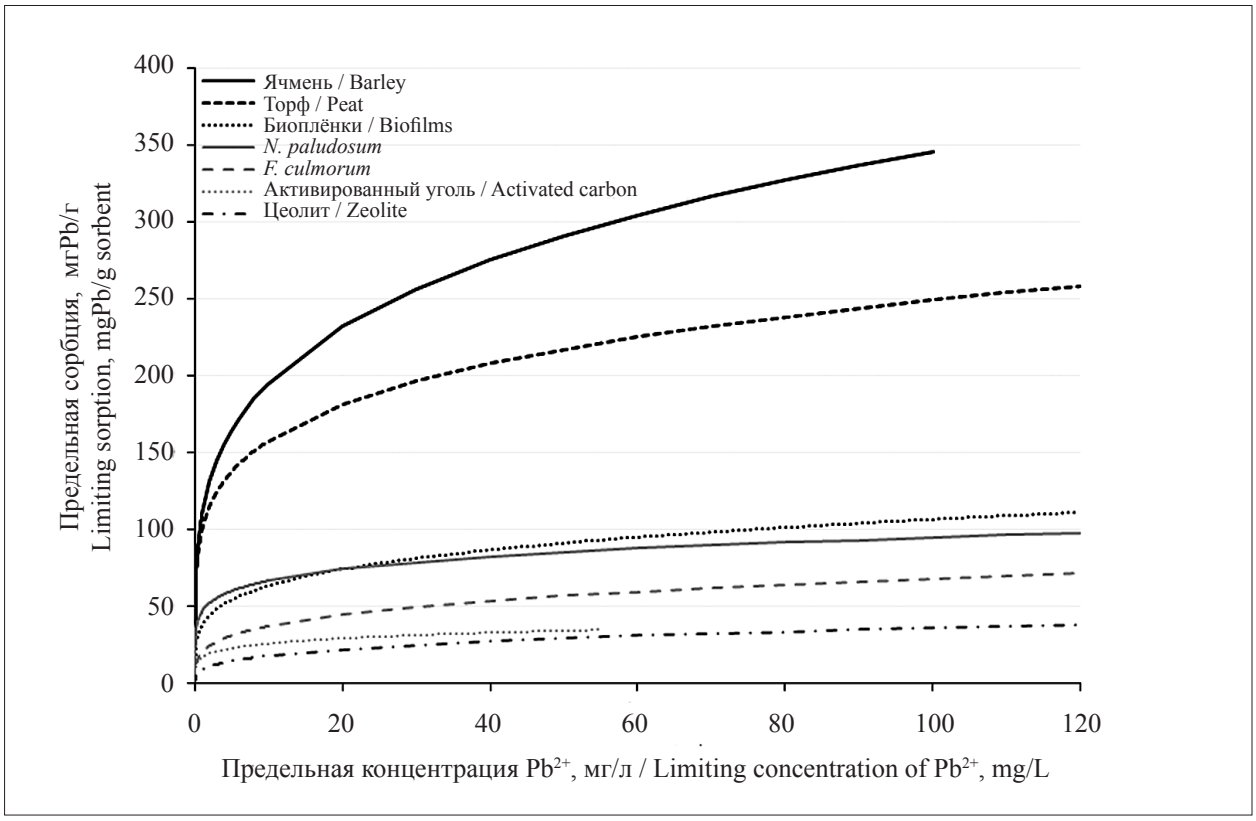


Рис. Изотермы сорбции Фрейндлиха для сорбентов различной природы
Fig. Freundlich sorption isotherms for sorbents of different nature

в нескольких слоях, модель Дубинина-Радушкевича – адсорбцию на тонкопористых сорбентах. При выполнении работы были построены изотермы адсорбции по экспериментальным данным и проведён подбор теоретической модели, которая бы наиболее оптимально описывала сорбцию.

Как видно из данных таблицы 3, для большинства сорбентов максимальные и высокие значения коэффициента детерминации установлены для уравнения Фрейндлиха. Уравнения Ленгмюра и Дубинина-Радушкевича оказались наиболее приемлемы для описания сорбции ионов свинца торфом.

Так как для исследуемых сорбентов получены максимальные и высокие значения r^2 (0,61–0,993) по уравнению Фрейндлиха, рассмотрим его параметры (табл. 2). Количество адсорбированного вещества возрастает пропорционально корню n-ой степени из концентрации раствора [16]:

$$A = K_F \cdot c_e^{1/n}, \quad (4)$$

где A – масса адсорбированных ионов свинца на 1 г сорбента (ммоль/г или мг/г), c_e – равновесная концентрация адсорбата (ммоль/л или мг/л), K_F и $1/n$ – константы, определяемые экспериментальным путём.

Ранее [5] было показано, что сорбция ионов меди(II) сухой биомассой плодовых тел высших грибов шампиньона двуспорового *Agaricus bisporus* и сыроежки волнистой *Russula atropurpurea* также хорошо описывается данной моделью.

Согласно модели, в первую очередь заполняются сорбционные центры с более сильной связывающей способностью, и прочность поглощения уменьшается с увеличением степени заполнения. Изотерма сорбции Фрейндлиха не имеет зоны насыщения и используется для описания сорбции из растворов с малыми и средними концентрациями [17].

K_F – константа равновесия, относящаяся к адсорбционной ёмкости. Физический смысл K_F состоит в том, что она соотвествует величине адсорбции при равновесной концентрации 1 моль/л. Постоянная K_F зависит от природы адсорбента и адсорбата.

Как видно из данных таблицы 4, наибольшие значения K_F установлены для листьев растений ячменя и торфа. Для ЦБ *N. paludosum* и БП с доминированием *N. commune* определены средние значения константы Фрейндлиха. Несколько ниже значения для микромицета *F. culmorum* и активированного угля. Минимальная величина K_F характерна для цеолита.

Второй константой уравнения Фрейндлиха является коэффициент неоднородности $1/n$, который указывает на интенсивность взаимодействия адсорбент – адсорбат. При «благоприятной» адсорбции ионов на адсорбенте значение $1/n$ лежит в пределах от 0,1 до 1 [18, 19]. В нашем исследовании значения коэффициента неоднородности составляют 0,172–0,300, что указывает на хорошую адсорбцию ионов свинца.

Согласно изотермам сорбции, построенным по уравнению Фрейндлиха, ряд сорбентов по снижению сорбционной способности выглядит так: ячмень > торф > биоплёнки *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > активированный уголь > цеолит (рис.).

Заключение

Изотерму сорбцию ионов свинца(II) большей части исследованных сорбентов хорошо описывает уравнение Фрейндлиха, которое предполагает неограниченную адсорбцию, а кинетику сорбции описывает уравнение модифицированной модели второго порядка, которое основано на том, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции и предполагает то, что в начальный момент времени адсорбция не равна нулю.

В ходе исследования был построены ряды сорбентов по снижению ёмкости сорбции по отношению к ионам свинца:

– по уравнению модели кинетики: ячмень ≥ торф > биоплёнки *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > активированный уголь > цеолит;

– по уравнению изотермы сорбции: ячмень > торф > биоплёнки *N. commune* > *N. paludosum* > *F. culmorum* > активированный уголь > цеолит.

Таким образом, ряды сорбентов, полученные при описании сорбции моделью кинетики и изотермы сорбции, полностью совпадают. Согласно им, наиболее эффективными сорбентами ионов свинца(II) являются листья ячменя и торф, наименее – активированный уголь и цеолит. Сорбенты на основе сухой биомассы микроорганизмов и их БП имеют среднюю эффективность.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформи-

рованные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

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

2. Saruchi Sh., Kumar V. Adsorption kinetics and isotherms for the removal of rhodamine B dye and Pb^{+2} ions from aqueous solutions by a hybrid ion-exchanger // Arabian Journal of Chemistry. 2019. V. 12. No. 3. P. 316–329. doi: 10.1016/j.arabjc.2016.11.009

3. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Biosorption of heavy metals by micromycetes: specificity of the process, mechanisms, kinetics // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 14–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031

4. Alghamdi A.A., Al-Odayni A.B., Saeed W.S., Al-Kahtani A., Alharthi F.A., Aouak T. Efficient adsorption of lead(II) from aqueous phase solutions using polypyrrole-based activated carbon // Materials (Basel). 2019. V. 12. Article No. 2020. doi: 10.3390/ma12122020

5. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Zhukova A.V. The use of mathematical models to assess the sorption abilities of higher mushrooms and activated carbon in relation to copper(II) ions // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 44–50 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-044-050

6. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kutyavina T.I. Comparative analysis of the effectiveness of the use of sorbents of different nature with respect to copper(II) ions // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 3. P. 12–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018

7. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Zhukova A.V., Ashikhmina T.Ya. Mushrooms as sorbents of cadmium ions // Butlerov Communications. 2019. V. 60. No. 12. P. 140–145 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/19-60-12-140

8. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Pegushina O.A., Fokina A.I. Biofilms *Nostoc commune* – a special microbial sphere // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 1. P. 15–19 (in Russian).

9. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // Separ. Purif. Methods. 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1018/SPM-100100009

10. Cheung W.H., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetic analysis of the sorption of copper(II) ions on chitosan // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2003. V. 78. No. 5. P. 562–571. doi: 10.1002/jctb.836

11. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // Journal of the American Chemical Society. 1918. V. 40. No. 9. P. 1361–1403. doi: 10.1021/ja02242a004

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

13. Dubinin M.M., Radushkevich L.V. Equation of the characteristic curve of activated charcoal // Proc. Acad. Sci. U.S.S.R. Phys. Chem. Sect. 1947. V. 55. P. 331.

14. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Sheshegova T.K. Assessment of sorption abilities of various species of *Fusarium* micromycetes in relation to heavy metal ions // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 102–109 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-103-109

15. Ayawei N., Ebelegi A.N., Wankasi D. Modelling and interpretation of adsorption isotherms // Hindawi Journal of Chemistry. 2017. V. 2017. Article No. 3039817. doi: 10.1155/2017/3039817

16. Workshop on physical chemistry NSU. Chemical thermodynamics and kinetics. Adsorption from solutions on a solid surface / Compiled by O.V. Netskina. Novosibirsk: RITs NSU, 2015. 17 p. (in Russian).

17. Ayawei N., Ekubo A.T., Wankasi D., Dikio E.D. Adsorption of congo red by Ni/Al-CO_3: equilibrium, thermodynamic and kinetic studies // Oriental Journal of Chemistry. 2015. V. 31. No. 30. P. 1307–1318.

18. Mouni L., Merabet D., Bouzaza A., Belkhiri L. Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon developed from Apricot stone // Desalination. 2011. V. 276. P. 148–153. doi: 10.1016/j.desal.2011.03.038

19. Weber T.W., Chakravorti R.K. Pore and solid diffusion models for fixed-bed adsorbers // Aiche J. 1974. V. 20. P. 228–238. doi: 10.1002/aic.690200204

УДК 543.95 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-052-059

Оптимизация условий определения токсичности водных растворов тетразольно-топографическим методом

© 2021. А. И. Фокина[1], к. б. н., доцент, С. Ю. Огородникова[2], к. б. н., с. н. с., Е. В. Веселова[1], магистрант, Л. В. Трефилова[3], к. б. н., доцент,
[1]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
[2]Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
[3]Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
e-mail: svetao_05@mail.ru, nm-flora@rambler.ru

В ходе исследования устанавливали оптимальные условия реализации тетразольно-топографической методики определения токсичности растворов с помощью почвенной цианобактерии (ЦБ) *Nostoc paludosum* 18. Возраст культуры ЦБ – 2 месяца (фаза стационарного роста), титр – 10^7 кл./см^3. Токсиканты (сульфат меди(II) и флорасулам) оказывали влияние на активность клеточных дегидрогеназ, что проявилось в изменении количества образовавшегося 2,3,5-трифенилформазана (ТФФ) из 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида (ТТХ). Количественно описывали образование ТФФ по результатам прямого счёта под микроскопом (считается доля клеток микроорганизмов, в которых образовались кристаллы ТФФ) и фотометрирования экстракта ТФФ из ЦБ. За токсичность принимали отклик, отличающийся от контроля более чем на 50% (культура без внесения токсикантов или оптимальные условия для жизнедеятельности микроорганизмов). С помощью метода спектрофотометрии установлено, что в клетках ЦБ из ТТХ образуется формазан. Оптимальные значения pH для определения токсичности растворов сульфата меди(II) и флорасулама тетразольно-топографическим методом находятся в интервале от 4 до 9 единиц. Коррелирующие между собой результаты, полученные методом спектрофотометрии и прямого счёта, лежат в области pH от 6 до 9 ед. Однако, в данном интервале pH заметно варьирование результатов спектрофотометрического анализа, особенно оно выражено в вариантах с флорасуламом. Для установления токсичности надёжнее оказалось использование метода прямого счёта клеток ЦБ под микроскопом. Установлено, что сульфат меди(II) и флорасулам достоверно не влияют на концентрацию формазана в растворе. Минерализация воды в интервале от 0,5 до 3,5 г/дм^3 не оказывала токсического влияния на ЦБ, при более высоком уровне минерализации происходила резкая активация дегидрогеназной активности, приводящая к интерпретации результата тестирования, как соответствующего категории «токсичность».

Ключевые слова: тетразольно-топографический метод, цианобактерии, спектрофотометрия, прямой счёт под микроскопом, токсичность, флорасулам, медь.

Tetrasol-topographic method for determining toxicity of aqueous solutions: conditions and approaches to realization

© 2021. A. I. Fokina[1] ORCID: 0000-0001-8265-8882, S. Yu. Ogorodnikova[2] ORCID: 0000-0001-8865-4743, E. V. Veselova[1] ORCID: 0000-0002-0968-8759, L. V. Trefilova[3] ORCID: 0000-0002-9932-5803,
[1]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[2]Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
[3]Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
e-mail: svetao_05@mail.ru, nm-flora@rambler.ru

The object of the study was the tetrazole-topographic method for determining the toxicity of solutions using soil cyanobacteria (CB) *Nostoc paludosum* 18. The CB culture *Nostoc paludosum* with a titer of 10^7 cells/cm^3 was used. Toxicants affect the activity of cellular dehydrogenases, which is manifested in a change in the amount of formation of

2,3,5-triphenylformazan (TPF) from 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TPC). A quantitative description of the formation of TPF can be obtained by direct counting under a microscope (the fraction of cells of microorganisms in which TPF crystals were formed is counted) and photometry of the TFP extract from CB. For indicator of toxicity, a response was taken that differs from the control (culture without toxicants) by more than 50%. Using the spectrophotometry method, it was proved that formazan is formed from the TPC in CB cells. The optimal pH values for determining the toxicity of solutions of copper (II) sulfate and florasulam by the tetrazole-topographic method are in the range 4 to 9. Comparable results are obtained by spectrophotometry and direct counting at pH from 6 to 9. It has been found that copper (II) sulfate and florasulam do not significantly affect the concentration of formazan in solution. It is better to use acetone as the TPF extractant; this allows you to determine formazan in a wider range of concentrations.

Keywords: tetrazole-topographic method, cyanobacteria, spectrophotometry, direct counting under a microscope, toxicity, florasulam, copper.

Микроорганизмы (МО) – одни из самых перспективных объектов исследования разнообразных научных направлений, в том числе и в области развития методов экологического контроля и мониторинга. В начале 2000-х годов на базе Вятской государственной сельскохозяйственной академии (г. Киров, Кировская область) начали оценивать токсичность водных растворов с помощью почвенных цианобактерий (ЦБ). За основу была взята методика определения жизнеспособности семян (ГОСТ 12039-82), однако она была применена не к семенам, а к почвенным ЦБ [1]. Под действием токсикантов активность дегидрогеназ микроорганизмов (МО) изменяется [2–4] и, как следствие, меняются количественные характеристики образования 2,3,5-трифенилформазана (ТФФ) из 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида (ТТХ). Количественно описать образование ТФФ можно по результатам прямого счёта под микроскопом (считается доля клеток МО, в которых образовались кристаллы ТФФ) и фотометрирования экстракта ТФФ из МО [5–8]. За токсичность принимается отклик, отличающийся более, чем на 50% от контроля (культура без внесения токсикантов или оптимальные условия для жизнедеятельности МО).

Важно, чтобы процесс определения токсичности был экспрессным, экономически целесообразным, тест-функция – чувствительной и адекватной, на результат не влияло субъективное мнение исследователя.

Применение живых организмов в ходе определения токсичности, а также аналитического сигнала (образование ТФФ), который может зависеть не от токсичности, а от различных химических факторов, вызывает необходимость детального исследования влияния условий на сигнал. По литературным данным известно, что формазаны реагируют с ионами тяжёлых металлов (ТМ) [9–11], что может влиять на аналитический сигнал при тестировании растворов, содержащих ионы ТМ, в частности меди, а кислотность среды влияет как на жизнедеятельность МО, независимо от присутствия токсикантов, так и на синтез формазана [4, 12]. При этом данные о влиянии кислотности и специфики взаимодействия веществ – токсикантов на адекватность получения аналитического сигнала тетразольно-топографическим методом с использованием ЦБ отсутствуют. Методика определения токсичности тетразольно-топографическим методом может быть использована для экспресс-оценки загрязнения водных объектов, токсичности водных растворов. Для внедрения методики в практику эколого-токсикологических исследований необходимо определить оптимальные условия выполнения анализа.

Важным этапом реализации любой методики является регистрация ответной реакции. Метод прямого счёта под микроскопом себя зарекомендовал давно. Однако, спектрофотометрическое окончание определения токсичности (фотометрирование экстракта формазана из ЦБ) позволяет получить более объективный результат, так как в ходе анализа учитывается 100% отклик всей исследуемой группы МО и исключается визуальная (субъективная) оценка наличия формазана. Для прямого счёта исследователь произвольно отбирает часть МО. Неоспоримым преимуществом метода прямого счёта является простота и экономичность, следовательно, доступность для реализации методики практически в любой лаборатории. Однако он продолжительнее, чем с применением спектрофотометрии и носит элементы субъективности.

Главным преимуществом использования ферментных анализов является то, что это относительно простые и общедоступные аналитические методы. Тетразольно-топографический метод определения токсичности различных объектов перспективен и входит в практику использования [5–8, 11]. Широкая распространённость, безопасность, простота и экономичность культивирования ЦБ, наличие отклика ферментативных

систем данных МО на действие токсикантов, позволяет видеть их перспективными тест-объектами. Однако для тетразольно-топографической методики определения токсичности растворов на основе ЦБ отсутствуют данные о влиянии:

– кислотности среды на токсичность поллютантов для ЦБ;

– концентрации токсикантов на концентрацию образовавшегося ТФФ;

– способа регистрации ответной реакции на результат анализа;

– типа экстрагента ТФФ из ЦБ на аналитические возможности методики;

– жёсткости и степени минерализации исследуемого раствора.

Изучение влияния различных факторов на результат, получаемый с помощью методики, позволяет выявить необходимые (оптимальные) условия её реализации.

Цель работы – установить оптимальные условия для процедуры определения токсичности водных растворов тетразольно-топографическим методом.

Объекты и методы исследования

Для установления оптимальных условий при процедуре определения токсичности водных растворов использовали почвенную ЦБ *Nostoc paludosum* 18. Цианобактерию предварительно выращивали на безазотистой среде Громова № 6 в условиях климатостата (освещённость 2000–3000 лк и температуре 20–22 °С). Систематически осуществляли контроль за чистотой культуры и её состоянием путём микроскопирования. На жизнеспособность цианобактерий указывает отсутствие разрушенных лизированных клеток, характерная пигментация, высокое содержание гетероцист (клеток, в которых идёт процесс азотфиксации), малое содержание спор. Для опытов применяли 2-х месячную культуру ЦБ в фазе стационарного роста, титр – 10^7 кл./см^3.

В качестве токсикантов использовали сульфат меди(II) и флорасулам. Актуальность использования в ходе исследования соли меди и флорасулама (гербицид) обусловлена широким распространением ионов меди и гербицидов в природных водах в процессе хозяйственной деятельности человека [13, 14].

Для достижения цели:

1) экспериментально проверяли факт образования ТФФ из ТТХ в клетках ЦБ. Для этого суспензию ЦБ заливали 0,1% раствором ТТХ, оставляли на 3 часа. Затем суспензию центрифугировали, ТФФ экстрагировали из ЦБ смесью ледяной уксусной кислоты с ацетоном (1 : 1), снимали спектрограмму с экстракта на спектрофотометре ПЭ5300ВИ (ООО «ЭКРОСХИМ», Санкт-Петербург) с шагом 10 нм в интервале 430–570 нм;

2) изучали влияние pH на образование ТФФ в ЦБ. Для этого культуру ЦБ вносили в водные растворы с разными значениями pH от 2 до 9 ед. (шаг – 1 ед.). Определённое значение pH создавали, добавляя растворы гидроксида натрия или лимонной кислоты, имеющих молярную концентрацию, равную 2 моль/дм^3. В зависимости от варианта опыта изучаемые растворы содержали:

– сульфат меди(II) с концентрацией Cu^{2+} равной 1 мг/дм^3 (ПДК в питьевой воде [15]);

– флорасулам с концентрацией 0,01 мг/дм^3 (ПДК в воде [16]);

– смесь соли меди и флорасулама с такими же концентрациями как в растворах индивидуальных веществ.

В качестве контроля использовали водные растворы с pH в исследуемом диапазоне без добавок изучаемых токсикантов.

Экспозиция ЦБ на исследуемых растворах составила 20 ч. Такая продолжительность экспозиции обеспечивает получение постоянных значений измерений. Затем культуру ЦБ отделяли от раствора центрифугированием и заливали на 3 ч 0,1%-ным раствором ТТХ. Далее методом прямого счёта под микроскопом, а также параллельно методом спектрофотометрии (экстракция смесью уксусной кислоты с ацетоном в соотношении 1 : 1) определяли долю клеток с кристаллами ТФФ и содержание ТФФ в клетках МО соответственно. Использовали индекс токсичности *T*, равный отношению:

$$T = 100 \cdot \frac{I_o - I}{I_o},$$

где I_o и I соответственно ответные реакции ЦБ на действие токсикантов в контроле и опыте. Тетразольно-топографическая методика допускает отклонение аналитического сигнала относительно контроля более 50% для интерпретации результата, как соответствующего категории «токсичность»;

3) получали формазан по методике [5]. Методом спектрофотометрии идентифицировали, что образовавшееся вещество ТФФ. Далее исследовали влияние Cu^{2+} (0,1; 1 и 10 мг/дм^3) и флорасулама (0,001; 0,01 и 0,1 мг/дм^3) на

Рис. Спектрограмма, снятая с экстракта (смесь ацетона с уксусной кислотой в соотношении 1 : 1) из цианобактерии *Nostoc paludosum* 18
Fig. Spectrogram of an extract (mixture of acetone and acetic acid in a 1 : 1 ratio) from the cyanobacterium *Nostoc paludosum* 18

концентрацию ТФФ в растворе (в качестве растворителя ТФФ использовали ацетон);

4) исследовали влияние жёсткости и минерализации водных растворов на аналитический результат методики. Для изучения влияния жёсткости готовили растворы из ацетата кальция с указанными концентрациями ионов кальция (ммоль/дм^3): 1,0; 2,5; 5,0; 7,0; 14,0 [17]. В качестве контроля использовали раствор с жёсткостью аналогичной той, которая была в культуральной жидкости ЦБ (7 ммоль/дм^3). Для изучения влияния минерализации готовили растворы из смеси солей (хлорид кальция, сульфат магния, гидрокарбонат натрия, сульфат калия) в соотношениях ионов, характерных для минеральной воды «Нижне-Ивкинская № 2К» (Кировская область), варианты соответствовали градации минерализации вод (г/дм^3): 0,5; 1,5; 3,5; 7,5; 12,5 (ГОСТ Р 54316-2011). В подготовленные растворы вносили культуру ЦБ и действовали аналогично пункту 2.

Опыты проводили в трёхкратной биологической и в двухкратной аналитической повторностях. В таблицах представлены средние арифметические значения и ошибки средних (доверительные интервалы). Обработку полученных данных измерений и статистический анализ проводили с использованием стандартного пакета Microsoft Office Excel. Достоверность различий вариантов с контролем определяли по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Идентификация формазана в клетках цианобактерии. С помощью метода спектрофотометрии в клетках ЦБ идентифицировано наличие ТФФ, образующегося из ТТХ. При 470–490 нм на спектрограмме, снятой с ацетонового экстракта из ЦБ, проконтактировавших с ТТХ, наблюдается максимальное светопоглощение. В данном диапазоне лежит максимум светопоглощения формазана (рис.).

Влияние pH на результат определения токсичности растворов.

В таблице 1 представлены значения величин отклонений ответных реакций в вариантах опытах от таковой в контроле (%), так как именно значения отклонений несут информацию о токсичности исследуемой среды. Если отклонение больше 50%, то раствор оказывает токсическое действие на ЦБ. Отрицательные значения говорят о том, что ответная реакция в опыте больше, чем в контроле.

Результаты спектрофотометрии и подсчёта клеток ЦБ с ТФФ под микроскопом позволили сделать вывод о том, что оптимальными значениями pH для определения токсичности данным методом являются 4–9 ед. (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Влияние кислотности растворов на отклонение результатов определения методом прямого счёта и спектрофотометрии от результатов в контрольных опытах / The influence of the acidity of solutions on the deviation of the results of determination by the method of direct counting and spectrophotometry from the results in control experiments

pH ед. units	Вариант / Variant								r_1
	контроль control		Cu^{2+} (1 мг/дм^3) Cu^{2+} (1 mg/dm^3)		флорасулам (0,01 мг/дм^3) florasulam (0.01 mg/dm^3)		Cu^{2+} (1 мг/дм^3) + флорасулам (0,01 мг/дм^3) Cu^{2+} (1 mg/dm^3) + florasulam (0.01 mg/dm^3)		
	1	2	1	2	1	2	1	2	
2	84*	100*	84*	100*	58*	98*	51*	100	0,43
3	47*	95*	60*	99*	58*	92*	69*	97	0,35
4	-29*	2	62*	47*	-4	58*	21*	74	0,53
5	-6	-1	45*	40*	8	56*	43*	78	0,67
6	0	0	47*	70*	-24*	24*	50*	67	0,84
7	-31*	1	49*	49*	13	60*	51*	77	0,86
8	-25*	3	14*	37*	0	54*	61*	74	0,88
9	-17*	-2	40*	40*	16*	67*	54*	76	0,80
r_2	0,94		0,73		0,97		0,39		

*Примечание: 1 – отклонение результата, полученного методом спектрофотометрии от контроля, %; 2 – отклонение от контроля результата, полученного методом прямого счёта, %; r – коэффициент корреляции между величинами отклонений от контроля (при уровне значимости 0,05): r_1 – варианты с одинаковым pH, r_2 – с разным pH, но одинаковым составом веществ в растворе; * – уровень значимости различий вариантов с контролем 0,05.*

*Note: 1 – deviation of the result obtained by spectrophotometry from the control, %; 2 – deviation from the control of the result obtained by the direct counting method, %; r – is the correlation coefficient between the values of deviations from the control (at a significance level of 0,05): r_1 – variants with the same pH, r_2 – with different pH, but the same composition of substances in the solution; * – level of significance of differences between variants with control 0.05.*

При pH 2 и 3 ед., клетки ЦБ погибали во всех вариантах, кроме варианта с pH 3 ед. в присутствии флорасулама.

Значения коэффициентов корреляции (r_1) между результатами, полученными методами спектрофотометрии и прямого счёта, полученными при разных pH, но при одинаковом составе растворов, показало, что без добавления токсикантов между результатами очень высокая положительная корреляция (r_1 = 0,94). Добавление в раствор соли меди (II) снижает значение коэффициента корреляции до 0,73 (высокая положительная взаимосвязь), а флорасулама – повышает до 0,97 (очень высокая положительная взаимосвязь). Совместное присутствие веществ вызывает процессы, приводящие к уменьшению силы корреляционной связи результатов, получаемых разными способами (табл. 1). Причиной могут быть особенности влияния веществ на ЦБ при различной кислотности среды.

Значения *r* между результатами спектрофотометрии и прямого счёта при одинаковом pH, но различном составе растворов (r_2) показывает, что коэффициент корреляции зависит от pH раствора: увеличивается от 0,43 до 0,84 при pH 2 и 6 ед. соответственно. Очень высокая положительная взаимосвязь между результатами спектрофотометрии и прямого счёта наблюдается в интервале pH 6–8 ед., при pH 9 ед. величина r_2 начинает снижаться (табл. 1).

Всё вышесказанное указывает на то, что поддержание кислотности во время проведения биотестирования – важнейшее условие получения адекватного отклика тест-объекта. Результаты, полученные двумя способами в интервале pH от 6 до 9 ед., будут коррелировать между собой. При этом в вариантах с медью оба способа позволят диагностировать токсичность и уровень, близкий к токсичности. Однако, в данном интервале pH заметно варьирование результатов при различной кислотности в случае спектрофотометрического анализа, особенно оно выражено в вариантах с флорасуламом, в связи с чем для установления токсичности надёжнее оказалось использование метода прямого счёта.

Одной из причин того, что в результате спектрофотометрической реализации тетразольно-топографического метода не удастся однозначно диагностировать токсичность, может быть присутствие в растворе веществ – токсикантов, способных влиять на

концентрацию ТФФ [8]. Поэтому нами было исследовано влияние концентрации Cu^{2+} и флорасулама на концентрацию формазана в модельном растворе.

Влияние ионов Cu^{2+} и флорасулама на концентрацию формазана в модельном растворе. Установлено, что сульфат меди(II) и флорасулам не влияют достоверно на концентрацию формазана в пределах концентраций равных 0,1–10 ПДК (табл. 2). Данный факт говорит о том, что даже, если в среде образования формазана будут находиться ионы меди(II) и флорасулам, то они не повлияют на величину ответной реакции.

Исследование влияния жёсткости и минерализации воды на результат анализа. Было изучено влияние жёсткости и минерализации воды на количественные характеристики образования формазана в клетках ЦБ. Классификация вод по минерализации приведена в соответствии с ГОСТ Р 54316-2011. В качестве контроля был выбран образец воды со средней жёсткостью, равной жёсткости культуральной жидкости ЦБ (7 ммоль/дм^3). Установлено, что ни один из вариантов с жёсткой водой нельзя интерпретировать, как токсичный (отсутствует отклонение от варианта со средней жёсткостью более 50%).

Согласно СанПиН 2.1.4.1116-02, физиологически полноценной считается вода, у которой значение показателя минерализации лежит в пределах 0,1–1,0 г/дм^3. В связи

Таблица 2 / Table 2

Влияние Cu^{2+} и флорасулама на концентрацию формазана в растворе
Influence of Cu^{2+} and florasulam on formazan concentration in solution

Вариант Variant	Концентрация, мг/дм^3 Concentration, mg/dm^3	Формазан, мг/дм^3 Formazan, mg/dm^3
Контроль / Control		6,75±0,06
Cu^{2+}	0,1	6,757±0,014
	1	6,57±0,16
	10	6,87±0,14
Флорасулам Florasulam	0,001	6,74±0,07
	0,01	6,49±0,07
	0,1	6,54±0,09

Таблица 3 / Table 3

Влияние жёсткости и минерализации воды на аналитический сигнал, получаемый тетразольно-топографическим методом / Influence of water hardness and salinity on the analytical signal obtained by the tetrazole-topographic method

Жёсткость / Water hardness			Минерализация / Salinity		
C(Ca^{2+}) ммоль/дм^3 mmol/dm^3	класс class	отклонение от контроля, % deviation from control, %	концентрация солей, г/дм^3 salt concentration, g/dm^3	класс class	отклонение от контроля, % deviation from control, %
1,0	мягкая soft	8,7			
2,5		-3,3	0,5	пресная (контроль) fresh (control)	0,0
5,0	средняя medium	-17,7	1,5	слабоминерализованная slightly mineralized	41,0
7,0	средняя (контроль) medium (control)	0,0	3,5	маломинерализованная low mineralized	19,0
10,0	жёсткая hard	6,9	7,5	среднеминерализованная medium mineralized	107,0
14,0	очень жёсткая very hard	27,3	12,5	высокоминерализованная highly mineralized	144,6

с этим, вода с минерализацией 1,0 г/дм^3 была выбрана в качестве контроля. Минерализация воды оказывает влияние на результат анализа. Пробы с минерализацией 0,5; 1,5 и 3,5 г/дм^3 не относятся к токсичным. При более высоких значениях минерализации происходит значительное возрастание образования формазана, что может быть связано с активизацией процессов, препятствующих влиянию гиперосмотических условий и, как следствие, активизацию дегидрогеназной активности. Таким образом, высокая минерализация воды ограничивает проведение биотестирования тетразольно-топографическим методом.

Выводы

Присутствие ТФФ в клетках ЦБ *N. paludosum* идентифицировали по наличию максимума оптической плотности экстракта из культуры МО в интервале длин волн 470–490 нм на спектрограмме, в котором находится максимум светопоглощения формазана.

Оптимальные значения pH для определения токсичности растворов тетразольно-топографическим методом находятся в интервале от 4 до 9 ед. Коррелирующие между собой результаты, полученные методом спектрофотометрии и прямого счёта, лежат в области pH от 6 до 9 ед. Исходя из стабильности значений величин отклонений ответных реакций в опытах от таковой в контроле, для установления токсичности надёжнее оказалось использование метода прямого счёта.

Выявлено, что сульфат меди(II) в концентрациях 0,1–10 мг/дм^3 и флорасулам в диапазоне концентраций 0,001–0,1 мг/дм^3 достоверно не влияют на концентрацию формазана в модельном растворе.

Установлено, что высокая минерализация воды (> 3,5 г/дм^3) ограничивает проведение биотестирования тетразольно-топографическим методом.

Знание оптимальных характеристик изучаемых водных растворов при проведении тестирования с помощью ЦБ будет способствовать более широкому применению тетразольно-топографического метода в эколого-токсикологических исследованиях за счёт повышения объективности получаемой информации.

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

References

1. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya., Ogrodnikova S.Yu., Olkova A.S., Fokina A.I. The use of the tetrazole-topographic method for determining the dehydrogenase activity of cyanobacteria in contaminated media // Theoretical and Applied Ecology. 2008. No. 2. P. 23–28 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-023-28

2. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.Yu., Olkova A.S., Fokina A.I. Biological monitoring of natural-technogenic systems. Primenenie tetrazolno-topograficheskogo metoda opredeleniya degidrogenaznoy aktivnosti tsianobakteriy v zagryaznennykh sredakh. Syktyvkar: Komi nauchnyy tsentr UrO RAN, 2011. P. 110–120 (in Russian).

3. Zyrin N.G., Valova E.E., Tsybenov Yu.B., Tsibikova E.V. The influence of heavy metals on the enzymatic activity of soils // Uchenye zapiski Zabaykalskogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta im. N.G. Chernyshevskogo. 2012. No. 1 (42). P. 63–66 (in Russian).

4. Casida L.E., Klein D.A., Santoro T. Soil dehydrogenase activity // Soil Science. 1964. V. 98. P. 371–376.

5. Instructions for laboratory control of treatment facilities in livestock complexes. Part III, Appendix I. Moskva: Kolos, 1984. 57 p. (in Russian).

6. Fokina A.I., Domracheva L.I., Zykova Yu.N., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Trefilova L.V. Improving the tetrazole-topographic bioassay method using cyanobacteria. Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 31–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041

7. Fokina A.I., Dabakh E.V., Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Ashikhmina T.Ya., Zykova Yu.N. Leonova K.A. Methodological approaches to chemical and biological diagnostics of the state of soils of technologically transformed territories // Soil Science. 2018. No. 5. P. 589–600 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X18050088

8. ISO 23753-1:2019. Soil quality – Determination of dehydrogenases activity in soils – Part 1: Method using triphenyltetrazolium chloride (TTC). 2019. 9 p. (in Russian).

9. Malachowska-Jutsz A., Matyja K., Ziembinska A. Cadmium and copper toxicity assessment in activated sludge using TTC bioassay // Archives of Environmental Protection. 2011. V. 37. No. 4. P. 85–94.

10. Malachowska-Jutsz A., Matyja K. Discussion on methods of soil dehydrogenase determination // International Journal of Environmental Science and Technology. 2019. V. 16. P. 7777–7790. doi: 10.1007/s13762-019-02375-7

11. Berdonosov D.G., Korsakova N.V., Ivanov S.A. The use of certain formazans for spectrophotometric determination of copper // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya. 2000. V. 41. No. 2. P. 136–139 (in Russian).

12. Hisashi J., Takahashi S., Kitamura M. Influence of acidic conditions on formazan assay: a cautionary note // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2010. V. 162. P. 1529–1535. doi: 10.1007/s12010-010-8934-z

13. Naumova M.E., Bukharin I.L., Vedernikov K.E. Development of a methodology for calculating the standards for the allowable intake of pollutants from the Podborenka river into the Izhevsk reservoir (on the example of nickel, copper and zinc) // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2019. No. 1. P. 75–85 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.75-85

14. Olkova A.S., Berezin G.I. Investigation of the sensitivity of certified biotests to water pollution by modern herbicides: model experiments // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2019. No. 1. P. 111–119 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.111-119

15. GN 2.1.5.1315-03. Maximum allowable concentration (MPC) of chemicals in the water of water bodies of domestic, drinking, and cultural and domestic water use. Moskva: Standartinform, 2003. 213 p. (in Russian).

16. GN 1.2.3111-13. Hygienic standards for the content of pesticides in environmental objects (list). Moskva: Standartinform, 2014. 133 p. (in Russian).

17. Guseva T.V., Zaika E.A., Vinichenko V.N., Molchanova Ya.P., Averochkin E.M. Hydrochemical indicators of the state of the environment: reference materials. Moskva: SoES, 2000. 148 p. (in Russian).

УДК 574.583+528.88 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-060-065

Использование нормализованного относительного альгоиндекса для оценки «цветения» воды в водохранилищах Вятско-Камского Предуралья

© 2021. Т. И. Кутявина[1], к. б. н., с. н. с., В. В. Рутман[1], м. н. с., Т. Я. Ашихмина[1, 2], д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
[1]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
[2]Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kutyavinati@gmail.com

На примере двух водохранилищ Кировской области, сходных по морфологическим особенностям и природным условиям, но отличающихся по уровню антропогенной нагрузки, показана возможность обнаружения скоплений фитопланктона с помощью нормализованного относительного альгоиндекса (NDAI). Расчёт индекса проведён по данным космоснимков, сделанных в период с мая по сентябрь 2015–2020 гг. со спутника Sentinel-2 (A, B). Индексные изображения построены в программном продукте QGIS версии 3.20. Полученные результаты сопоставлены с данными полевых наблюдений. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища во время вегетационного периода изменялись в пределах от 0,36 до 0,80, на акватории Чернохолуницкого водохранилища – от 0,32 до 0,84. В период с мая по июль наблюдали возрастание средних значений NDAI, а в августе и сентябре – снижение. Интенсивное «цветение» воды в изученных водохранилищах, согласно данным полевых наблюдений и результатам расчёта NDAI, отмечали в августе 2016 и июле 2020 гг. Оптическая плотность «цветущей» воды при этом составляла от 0,150 и выше (длина оптического пути кюветы 10 мм, λ = 615 нм), а значения NDAI от 0,50 и более.

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

The use of the normalized relative algoindex for the assessment of algae blooms in the reservoirs of the Vyatka-Kama cis-Urals

© 2021. T. I. Kutyavina[1] ORCID: 0000-0001-7957-0636,
V. V. Rutman[1] ORCID: 0000-0002-9025-3487,
T. Ya. Ashikhmina[1, 2] ORCID: 0000-0003-4919-0047,
[1]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[2]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: kutyavinati@gmail.com

The article presents the results of monitoring of two plain reservoirs located in the Vyatka-Kama Pre-Urals, according to remote sensing data and field observations. The reservoirs located in the Kirov region have similar morphological parameters, the same origin, but differ in the level of anthropogenic load. According to the satellite images taken from the Sentinel-2 satellite (A, B) in the period from May to September 2015–2020, the normalized relative algoindex (NDAI) was calculated. This index allows you to detect accumulations of phytoplankton in reservoirs. The NDAI values do not depend on atmospheric interference and the influence of the reflection spectrum of the water itself. The index images are built in the QGIS software product, version 3.20. The results obtained are compared with the data of field observations on reservoirs. The NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir during the observation period varied from 0.36 to 0.80, in the water area of the Chernokholunitsky reservoir from 0.32 to 0.84. Intensive algae bloom in the studied reservoirs was observed in August 2016 and July 2020. In the water areas where intense algae blooming was noted, the following species prevailed in the phytoplankton samples: *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunnthaler, *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault. The optical density of water in this case was 0.150 and higher (the length of the optical path of the cuvette is 10 mm, λ = 615 nm), and the NDAI values were more than 0.50.

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

Дистанционные методы анализа в последние годы широко применяются для оценки состояния водных объектов [1–4]. Разработано большое количество спектральных индексов для обнаружения и количественной оценки скоплений фитопланктона («цветения» воды) и зарослей высших водных растений на морских акваториях и внутренних водоёмах [5–8]. Водные объекты значительно отличаются друг от друга по таким параметрам, как цветность и мутность воды, наличие в воде взвешенных веществ, видовой состав и степень развития фитопланктона. Все эти параметры необходимо учитывать при выборе спектральных индексов для изучения конкретного водоёма. Например, в работе [9] для мониторинга состояния оз. Эри (Канада, США), характеризующемся наличием взвешенных и окрашенных растворённых органических веществ, был использован индекс концентрации хлорофилла *a* ($chl_a_{(MERIS)}$) в двух вариантах, учитывающих отражательную способность воды при 490, 560, 665 и 708 нм. Наиболее пригодным для оценки экологического состояния гипертрофного оз. Альбуфера (Испания) оказался расчёт индекса концентрации хлорофилла *a* – TBDO (triband model of Dall'Olmo et al.), учитывающий отражательную способность воды при 665, 705 и 740 нм [10]. Выбор наиболее информативных индексов для изучения конкретных водных объектов проводится эмпирическим путём: на основе спутниковых данных строятся индексные изображения, и производится их сопоставление с результатами полевых работ. Если между данными, полученными дистанционными и полевыми методами, наблюдается достаточно тесная корреляционная связь, спектральные индексы используются в дальнейшей работе. Если данные не сопоставимы, вводятся корректирующие коэффициенты для спектральных индексов или подбираются другие индексы.

Цель данной работы – оценить возможность использования нормализованного относительного альгоиндекса для выявления скоплений фитопланктона в водохранилищах Кировской области.

Объекты и методы исследования

Кировская область расположена на северо-востоке Русской равнины в центрально-восточной части Европейской России. Крупнейшие водоёмы находятся в северо-восточной части региона, в Вятско-Камском физико-географическом округе. Это Белохолуницкое, Омутнинское, Большое Кирсинское и Чернохолуницкое водохранилища. В данном исследовании рассматриваются Омутнинское и Чернохолуницкое водохранилища, как наиболее сопоставимые по географическому положению, природным условиям и морфологическим особенностям водоёмы [11]. Отличия водных объектов заключаются в интенсивности антропогенной нагрузки: на берегах Омутнинского водохранилища располагаются металлургический завод и лечебно-оздоровительные учреждения, г. Омутнинск с численностью населения 21431 чел., на берегах Чернохолуницкого водохранилища находятся рыбоводческое предприятие и пос. Черная Холуница с численностью населения 950 чел. (данные на 1 января 2021 г.). Площадь зеркала водохранилищ составляет 9,5 и 2,96 км^2 соответственно. Регулярные наблюдения за экологическим состоянием указанных водоёмов ведутся с 2011 г. Для изучаемых водохранилищ характерны высокая мутность (от 5 единиц по формазину и выше) и цветность воды (от 12 до 127 градусов цветности), что оказывает влияние на спектральную отражательную способность воды в водоёмах. Ранее нами уже были рассчитаны спектральные индексы NDVI, NDWI, индексы цвета и мутности воды, индексы концентрации хлорофилла *a* в воде с целью определения границ изучаемых водоёмов, выявления на их акваториях скоплений фитопланктона и зарослей высших водных растений [12].

В настоящей работе приведены результаты расчёта нормализованного относительного альгоиндекса (NDAI). Этот индекс впервые был предложен в работе [13] для обнаружения скоплений фитопланктона в Воронежском водохранилище по данным космоснимков со спутников Landsat. В летне-осенний период для Воронежского водохранилища характерно преобладание в фитопланктоне цианобактерий. Согласно данным [13], значения NDAI не зависят от атмосферных помех и влияния спектра отражения самой воды; чем выше значение индекса, тем интенсивнее развитие фитопланктона на исследуемом участке акватории.

Расчёт NDAI проводится по формуле [13]:

$$NDAI = \frac{I_G + 2I_{NIR} - I_B - I_R}{I_G + 2I_{NIR} + I_B + I_R} + 0{,}5,$$

где I_B, I_G, I_R, I_{NIR} – яркость излучения водного объекта в синем (канал B2), зелёном (B3), красном (B4) и ближнем инфракрасном (B8) диапазонах соответственно.

Для расчёта NDAI использовали космические снимки со спутника Sentinel 2 (A, B), размещённые в свободном доступе на сайте Геологической службы США (https://earthexplorer.usgs.gov/). Всего было проанализировано 20 разновременных сцен с 2015 по 2020 гг., на которых акватории изучаемых водохранилищ были свободны от облаков. В работе использовали снимки, сделанные в вегетационный период (с мая по сентябрь). Расчёт NDAI и построение индексных изображений проводили в программном продукте QGIS версии 3.20. Для изучаемых водохранилищ эмпирическим путём была подобрана относительная шкала значений NDAI с минимумом 0,3 и максимумом 1,0. Полученные индексные изображения сопоставляли с результатами полевых биоиндикационных исследований, проведённых на акватории Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ в 2015–2020 гг.

Статистическую обработку результатов проводили в Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным данным, минимальные значения NDAI (0,32–0,38) отмечены в мае и начале июня 2017 и 2020 гг., максимальные (0,75–0,84) – в июле и августе 2016, 2019 и 2020 гг. Для сравнения, на акватории Матырского водохранилища, сопоставимого с водохранилищами Кировской области по морфометрическим параметрам и гидрохимическим характеристикам, в период наблюдений с мая по сентябрь 1984–2014 гг. значения NDAI составляли в среднем от 0,26 до 0,44 [14], а на акватории Лукомского озера (Белоруссия) 18.05.2015 г. – от 0,42 до 1,16 [15].

Практически на всех снимках значения NDAI на мелководных прибрежных участках акватории Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ были выше по сравнению с более глубоководными участками в центральной части водоёмов, то есть скопления фитопланктона преимущественно находились на мелководьях. В качестве примера на рисунке 1 (см. цв. вкладку IV) представлены снимки водохранилищ, сделанные 13.08.2017 г. Аналогичное распределение значений NDAI по акватории и увеличение биомассы фитопланктона на мелководных прибрежных участках по сравнению с центральной частью водоёма отмечено для Лукомского озера [15]. Более высокий уровень развития фитопланктона (в 2–3 раза) на мелководьях по сравнению с руслом в летнее время характерен также для Волжских водохранилищ [16]. Это объясняется рядом факторов: более интенсивным прогревом водной среды и повышенным содержанием биогенных элементов на прибрежных участках. Вероятно, эти же факторы повлияли на развитие фитопланктона на мелководьях водохранилищ Кировской области.

При сопоставлении рассчитанных значений NDAI с данными полевых наблюдений на акваториях Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ в 2015–2020 гг. было отмечено, что при значениях NDAI выше 0,50 на акватории наблюдается массовое развитие фитопланктона. При визуально наблюдаемом «цветении» оптическая плотность воды достигала 0,150–0,220 и выше, а при отсутствии признаков «цветения» составляла около 0,060 (измерения оптической плотности проводили на спектрофотометре при $\lambda = 615$ нм в кювете с длиной оптического пути 10 мм).

Если проследить временную динамику изменений значений NDAI, то можно отметить, что с мая по июль средняя для всей акватории величина NDAI возрастала, а затем, с июля по сентябрь, снижалась как в Омутнинском, так и в Чернохолуницком водохранилищах (табл. 1).

Из литературных данных известно, что сезонные изменения содержания хлорофилла *a*, по которому оценивают биомассу фитопланктона, можно объяснить динамикой погодных и гидрологических условий [16]. Увеличение значений NDAI в период с мая по июль в 2015–2020 гг. вполне согласуется с ростом температуры воздуха в этот же период наблюдений (рис. 2).

Наибольший размах вариации между минимальными и максимальными значениями NDAI отмечен на июльских индексных изображениях, а наименьший – на майских и сентябрьских (табл. 1). То есть в мае и сентябре распределение фитопланктона по акватории Омутнинского водохранилища было более равномерным, чем в июле, участки массового развития фитопланктона не были обнаружены.

Вспышки интенсивного развития фитопланктона визуально и на космоснимках были зафиксированы в Омутнинском и Чернохолуницком водохранилищах в августе 2016 г. (снимок от 25.08.2016, NDAI от 0,64 до 0,80 и от 0,58 до 0,70 соответственно) и июле 2020 г. (08.07.2020, NDAI от 0,60 до 0,75 и от 0,64 до 0,84 соответственно), только в Омутнинском водохранилище – в июле 2018-го (26.07.2018, NDAI от 0,67 до

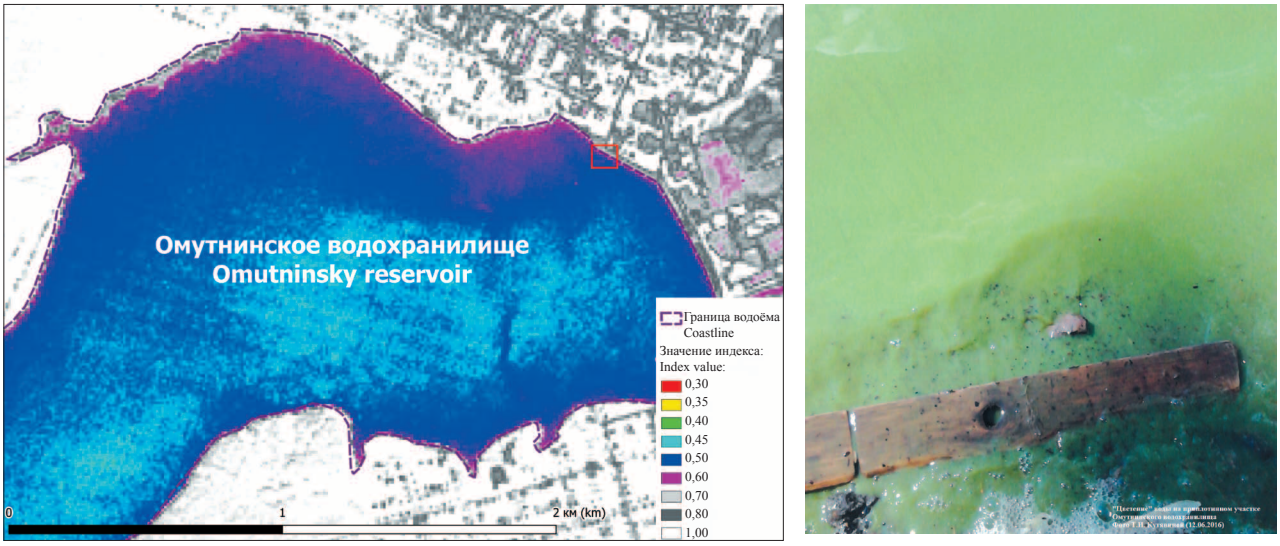


Рис. 1. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища 07.06.2016 (слева) и фотография приплотинного участка Омутнинского водохранилища 12.06.2016 (справа)
Fig. 1. NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir 07.06.2016 (left) and a photo of the dam section of the Omutninsky reservoir 12.06.2016 (right)

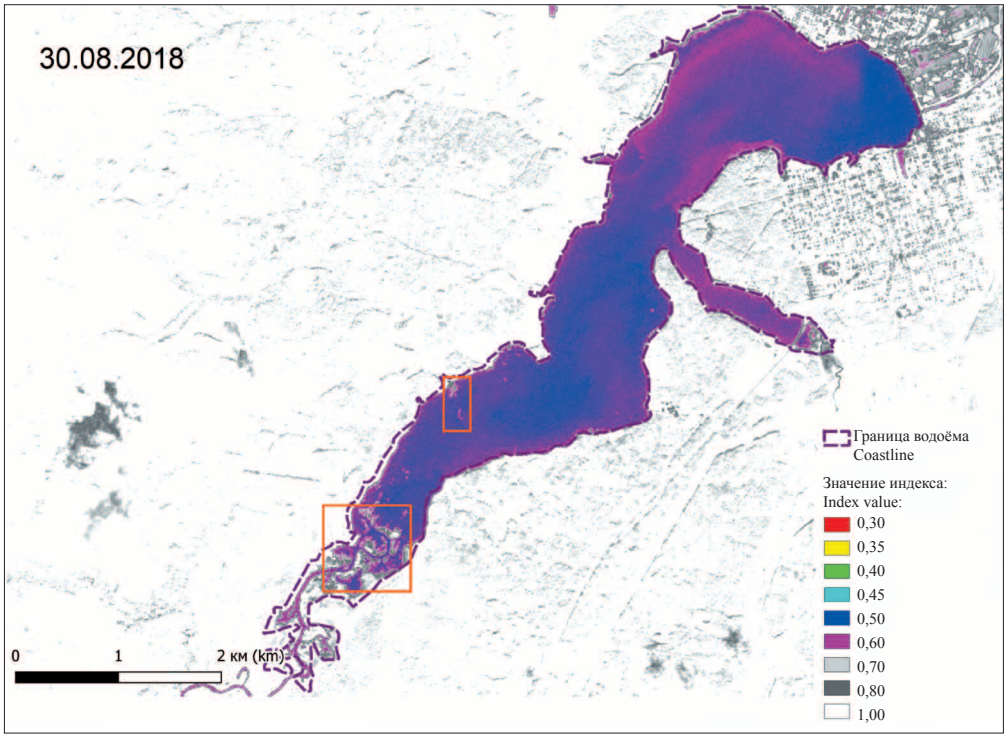


Рис. 3. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища в разные периоды времени
Fig. 3. NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir in different time periods

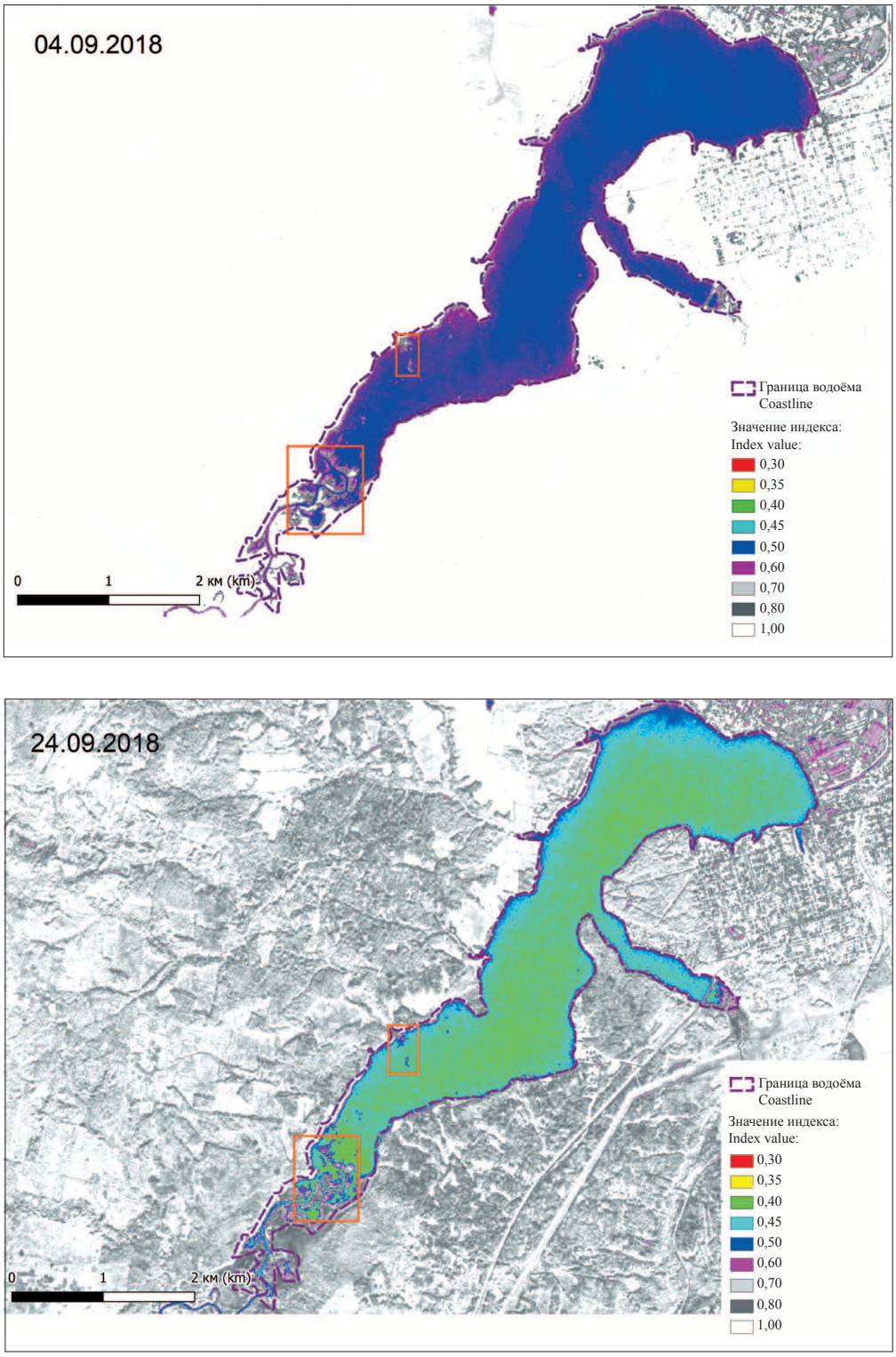


Рис. 3. Значения NDAI на акватории Омутнинского водохранилища в разные периоды времени
Fig. 3. NDAI values in the water area of the Omutninsky reservoir in different time periods

Таблица 1 / Table 1

Средние значения и размах значений NDAI для Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ за период 2015–2020 гг. / The average NDAI values and the range of NDAI values for the Omutninsky and Chernokholunitsky reservoirs for the period 2015–2020

Водохранилище Reservoir	Месяц / Month				
	май May	июнь June	июль July	август August	сентябрь September
Омутнинское Omutninsky	0,385 / 0,075	0,505 / 0,085	0,675 / 0,140	0,506 / 0,103	0,454 / 0,084
Чернохолуницкое Chernoholunitsky	0,445 / 0,100	0,475 / 0,250	0,567 / 0,187	0,507 / 0,167	0,440 / 0,210

Примечание: в числителе указано среднее арифметическое значение NDAI, в знаменателе – размах вариации.
Note: the numerator indicates the arithmetic mean of NDAI, the denominator indicates the scope of variation.

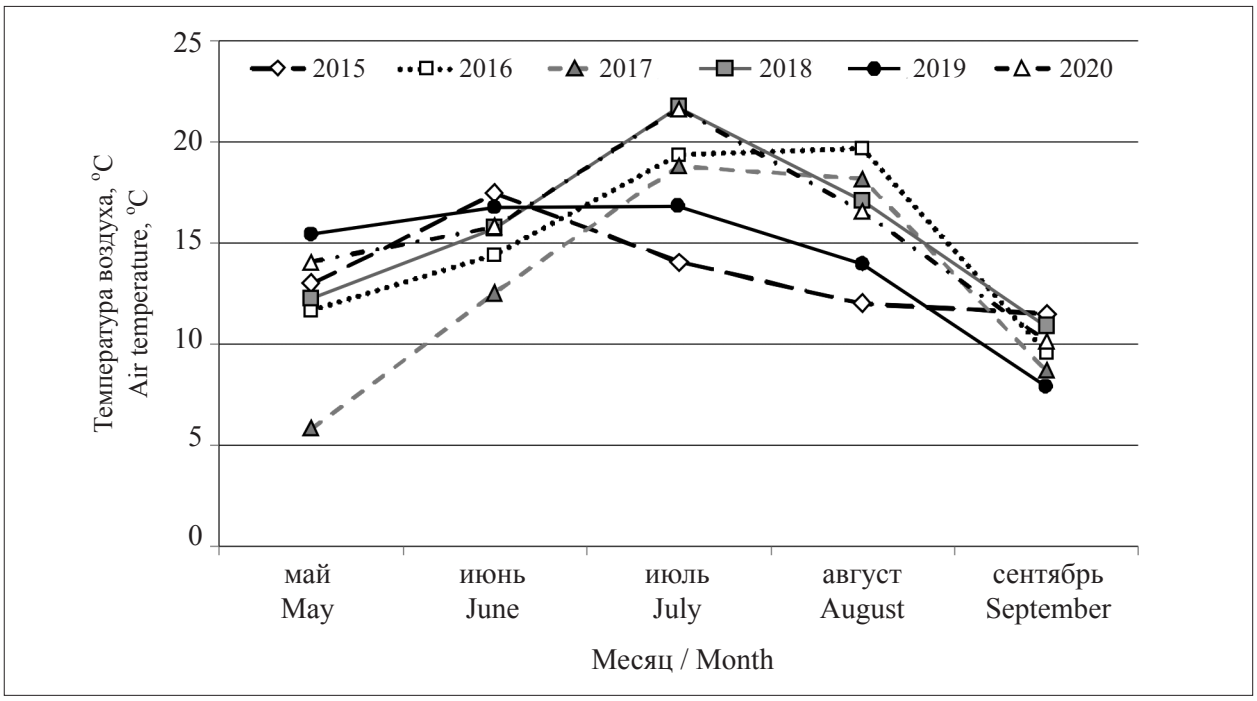


Рис. 2. Средняя температура воздуха в районе исследований в 2015–2020 гг.
Fig. 2. The average air temperature in the research area in 2015–2020

0,80). Наибольшие значения NDAI на перечисленных снимках были отмечены на мелководьях в центральном и приплотинном (северном) участках водохранилищ, а также в заливах. Глубины на этих участках небольшие (до 3 м), водообмен замедленный, вода хорошо прогревается. Благоприятными для развития фитопланктона были и погодные условия: в августе 2016-го, июле 2018 г. и 2020-го гг. дни были преимущественно ясные, безветренные, а среднемесячная температура воздуха была достаточно высокой (20–22 °C), что также способствовало «цветению» воды.

С помощью индексных изображений NDAI достаточно чётко можно проследить динамику развития фитопланктона. На рисунке 3 (см. цветную вкладку V) представлены снимки, сделанные во время интенсивного «цветения» воды в Омутнинском водохранилище и в последующие дни, когда «цветение» воды визуально уже практически не отмечалось. Можно отметить, что на снимке, сделанном 30.08.2018 г., максимальные значения NDAI наблюдаются вдоль берегов на приплотинном участке и в заливе в центральной части водохранилища. В пробах фитопланктона на этих участках преобладали *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunnthaler. При продвижении к русловым участкам водохранилища и непосредственно перед плотиной (северо-восточная часть водохранилища) значения индекса снижаются. На снимке, сделанном 04.09.2018 г., площади, для которых характерно интенсивное «цветение» воды, значительно сократились на централь-

ном и приплотинном участках водохранилища, но несколько увеличились в верховье (южной части). Спустя три недели, 24.09.2018 г., «цветение» воды на акватории Омутнинского водохранилища уже практически не отмечалось, за исключением небольшого участка в приплотинной части водоёма.

При анализе построенных индексных изображений было отмечено, что с помощью NDAI можно обнаружить на акватории водоёма не только фитопланктон, но и заросли высших водных растений. На акватории Омутнинского водохранилища заросли макрофитов отличались от скоплений фитопланктона более высокими значениями индекса (NDAI = 0,70–0,80) в течение всего вегетационного периода и более чёткими контурами. Авторы работы [14] отмечали, что на участках Матырского водохранилища, занятых зарослями жёсткой околоводной растительности, значения NDAI достигали 0,55. На рисунке 3 оранжевыми прямоугольниками выделены участки акватории Омутнинского водохранилища, на которых при полевых наблюдениях в 2015–2020 гг. были зафиксированы заросли камыша озёрного (*Schoenoplectus lacustris*), горца земноводного (*Persicaria amphibia*) и других высших растений.

Заключение

Таким образом, нормализованный относительный альгоиндекс оказался пригоден для выявления скоплений фитопланктона и зарослей высших водных растений на акватории Омутнинского и Чернохолуницкого водохранилищ Кировской области, а также для оценки динамики развития фитопланктона. При проведении исследования было отмечено, что в течение вегетационного сезона значения NDAI изменяются в широких пределах: от 0,32 до 0,84, максимальные значения чаще всего наблюдаются на прибрежных мелководных участках, что характерно для большинства русловых водохранилищ. Более интенсивное «цветение» воды, согласно значениям NDAI и данным полевых наблюдений, было отмечено на акватории Омутнинского водохранилища, для которого характерна повышенная антропогенная нагрузка по сравнению с Чернохолуницким водохранилищем. Интенсивному «цветению» воды в водоёмах соответствовали значения индекса от 0,55 и выше, чаще всего они наблюдались в июле и августе. В этот же период «цветение» воды наблюдается в большинстве водоёмов умеренной зоны.

Работы по расчёту нормализованного относительного индекса планируется включить в программу наблюдений за экологическим состоянием водохранилищ Кировской области.

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

References

1. Sakuno Y., Yajima H., Yoshioka Y., Sugahara S., Abd Elbasit M.A.M., Adam E., Chirima J.G. Evaluation of unified algorithms for remote sensing of chlorophyll-*a* and turbidity in lake Shinji and lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam reservoir of South Africa under eutrophic and ultra-turbid conditions // Water. 2018. V. 10. Article No. 618. doi: 10.3390/w10050618

2. Pahlevan N., Chittimalli S.K., Balasubramanian S.V., Vellucci V. Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 220. P. 19–29. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.027

3. Rodrigues T., Mishra, D., Alcantara E., Astuti I., Watanabe F., Imai N. Estimating the optical properties of inorganic matter-dominated oligo-to-mesotrophic inland waters // Water. 2018. V. 10. No. 4. Article No. 449. doi: 10.3390/w10040449

4. Ritchie J.C., Zimba P.V., Everitt J.H. Remote sensing techniques to assess water quality // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2003. No. 6. P. 695–704. doi: 10.14358/PERS.69.6.695

5. 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.

6. Gower J., King S., Borstad G., Brown L. Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer // Int. J. Remote Sens. 2005. V. 26. No. 9. P. 2005–2012. doi: 10.1080/01431160500075857

7. Mishra S., Mishra D.R. Normalized Difference Chlorophyll Index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters // Remote Sens. Environ. 2012. V. 117. P. 394–406. doi: 10.1016/j.rse.2011.10.016

8. Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Tenjo C., Delegido J., Urrego E.P., Peña R., Vicente E., Soria J.M., Soria-Perpiyá X., Moreno J. Calibration and validation of algorithms for the estimation of chlorophyll-*a* and Secchi disc depth in inland waters with Sentinel-2 // Limnetica. 2019. V. 38 (1). P. 471–487. doi: 10.23818/limn.38.27

9. Ali K., Witter D., Ortiz J. Application of empirical and semi-analytical algorithms to MERIS data for estimating chlorophyll *a* in case 2 waters of Lake Erie // Envi-

ron Earth Sci. 2014. V. 71. P. 4209–4220. doi: 10.1007/s12665-013-2814-0

10. 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

11. Kutyavina T.I., Domnina E.A., Ashikhmina T.Ya., Savinikh V.P. Morphometric, hydro-chemical and biological characteristics of the ponds of the North-East of Kirov region // Theoretical and Applied Ecology. 2013. No. 2. P. 50–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-050-055

12. Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-028-033

13. Silkin K.Yu. Methodology for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on the materials of multi-zone remote sensing // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2012. No. 1. P. 220–223 (in Russian).

14. Valyalschikov A.A., Silkin K.Yu., Kulnev V.V. Analysis of the ecological state of the Matyr reservoir according to the data of ecological-hydrochemical and satellite monitoring // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2014. No. 1. P. 110–117 (in Russian).

15. Protasov A.A., Barinova S., Novoselova T.N., Buseva Zh.F., Tomchenko O.V., Sylaieva 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

16. Khaliullina L.Yu., Yakovlev V.A. Phytoplancton of shoals in upper reaches of the Kuibyshev reservoir. Kazan: Academy of Science of Republic of the Tatarstan Press, 2015. 171 p. (in Russian).

УДК 582.795:581.524.2:631.452-043.7(470.13) doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-066-073

Влияние инвазии борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на плодородие постагрогенных почв Европейского Северо-Востока

© 2021. Е. М. Лаптева[1], к. б. н., доцент, зав. отделом,
И. Г. Захожий[1], к. б. н., н. с., И. В. Далькэ[1], к. б. н., зав. лабораторией,
Ю. А. Смотрина[2], студент, Э. А. Генрих[2], студент,
[1]Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
[2]Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55,
e-mail: lapteva@ib.komisc.ru

На основе комплекса полевых и лабораторных исследований оценено влияние экспансии инвазионного вида *Heracleum sosnowskyi* на формирование постагрогенных экосистем в биоклиматических условиях средней тайги Республики Коми. Определены запасы фитомассы в самоподдерживающихся зарослях *H. sosnowskyi* и содержание в ней углерода, азота и зольных элементов. Показано, что в биоклиматических условиях средней тайги продуктивность *H. sosnowskyi* в постагрогенных экосистемах составляет в расчёте на свежий растительный материал 103,6±27,8 т/га надземных и 32,3±6,8 т/га подземных органов (или соответственно 14,5±3,9 и 7,7±1,6 т/га сухой фитомассы). Это соответствует урожайности данного вида в культуре (50–100 т/га) и существенно выше биопродуктивности (2,5–4,5 т/га сухой надземной фитомассы) растительных сообществ суходольных и пойменных лугов в регионе. Внедрение *H. sosnowskyi* в постагрогенные экосистемы Севера способствует сохранению и поддержанию почвенного плодородия за счёт ежегодного возврата с опадом значительных объёмов быстро минерализуемого растительного материала (17,4 т/га), в том числе органического углерода (7,4 т/га), азота (208 кг/га) и зольных элементов (847 кг/га).

Ключевые слова: постагрогенные экосистемы, борщевик Сосновского, инвазия, почвенное плодородие, запасы фитомассы и зольных элементов.

Influence of *Heracleum sosnowskyi* Manden. invasion on postagrogenic soil fertility in European North-East

© 2021. E. M. Lapteva[1] ORCID: 0000-0002-9396-7979,
I.G. Zakhozhiy[1] ORCID: 0000-0003-0918-745X, **I. V. Dalke[1]** ORCID: 0000-0001-5711-9916,
Y. A. Smotrina[2] ORCID: 0000-0003-4682-7794, **E. A. Genrikh[2]** ORCID: 0000-0001-9085-4365,
[1]Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Science,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
[2]Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,
55, Oktyabrsky Prospekt, Syktyvkar, Russia, 167001,
e-mail: lapteva@ib.komisc.ru

On the basis of field and laboratory studies, the influence of the expansion of the invasive species *Heracleum sosnowskyi* on the formation of postagrogenic ecosystems in the bioclimatic conditions of the middle taiga of the Komi Republic was evaluated. The stocks of phytomass in the self-sustaining thickets of *H. sosnowskyi* were determined, and the stocks of ash elements in them were estimated. It has been shown that under the bioclimatic conditions of the middle taiga, the productivity of *H. sosnowskyi* per green mass in postagrogenic ecosystems is 103.6±27.8 ton/ha of aboveground and 32.3±6.8 ton/ha of underground organs (or, respectively, 14.5±3.9 and 7.7±1.6 ton/ha of dry phytomass), which corresponds to the yield of this species in culture (50–100 ton/ha) and significantly higher than the bioproductivity of dry and floodplain meadows (2.5–4.5 ton/ha) in the region. The introduction of *H. sosnowskyi* into the postagrogenic

ecosystems of the North contributes to the preservation and maintenance of soil fertility due to the annual return of fast mineralized plant material with litter (17.4 ton/ha), including organic carbon (7.4 ton/ha), nitrogen (208 kg/ha) and ash elements (847 kg/ha).

Keywords: postagrogenic ecosystems, *Heracleum sosnowskyi*, invasion, soil fertility, stocks of phytomass and ash elements.

Формирование постагрогенных экосистем на залежных землях сопровождается последовательным восстановлением на них зональных типов растительных сообществ и почв, соответствующих данной биоклиматической зоне [1]. На рубеже XX–XXI веков этот процесс существенно осложнился за счёт внедрения в постагрогенные экосистемы инвазионных видов. Среди них особую обеспокоенность вызывает борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) [2–4]. В настоящее время он признан опасным для человека и животных [5, 6], способным нанести значительный вред агроландшафтам и сельхозугодьям [7]. В последние годы получены данные о роли борщевиков и других инвайдеров в трансформации циклов углерода, азота, биогенных элементов в экосистемах с их монодоминантными сообществами [8–10], протекании в почвах таких экосистем процессов нитрификации и денитрификации [11], проявлении токсичных и аллелопатических свойств [12], функционировании почвенной биоты – дрожжей [13], актиномицетов [14], нематод [15].

Цель данной работы заключалась в оценке состава и запасов фитомассы *Heracleum sosnowskyi* Manden. на залежных землях в условиях средней тайги и выявлении закономерностей изменения свойств постагрогенных почв под влиянием развития их монодоминантных зарослей.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили заброшенные участки пашни, выделенные нами на территории нескольких муниципальных образований Республики Коми (РК): ключевые участки 1, 2 – муниципальное образование муниципальный район (МО МР) «Княжпогостский», 3, 4 – МО МР «Сыктывдинский», 5, 6, 7 – муниципальное образование городской округ (МО ГО) «Сыктывкар», 8 – МО МР «Прилузский». Все залежные участки приурочены к водоразделам или приречным увалам. Их почвенный покров до начала сельскохозяйственного освоения был представлен автоморфными подзолистыми почвами. В настоящее время растительный покров на всех участках занят сообществами с доминированием *H. sosnowskyi*, ориентировочный возраст которых 7–15 лет.

Структуру и запасы фитомассы в монодоминантных зарослях *H. sosnowskyi* оценивали на одном из ключевых участков (участок 5, МО ГО «Сыктывкар») в соответствии с методическими указаниями [16]. В период бутонизации – начала цветения растений закладывали трансекту, выделяли учётные площадки размером 1,5 × 1,5 м ($n = 5$), на которых выкапывали все имеющиеся растения *H. sosnowskyi*. Подземные органы извлекали на глубину до 30 см. Растения разделяли на отдельные части (прикорневые и стеблевые листья, черешки листьев, стебли генеративных растений, стеблекорни) и высушивали до воздушно-сухого состояния. Для количественного химического анализа готовили средние пробы, составленные из индивидуальных образцов 15–20 растений. Запасы химических элементов в растительном веществе *H. sosnowskyi* рассчитывали путём умножения массы структурных компонентов на единице площади на содержание в них соответствующего элемента.

Для оценки влияния инвайдера на свойства постагрогенных почв в пределах каждого ключевого участка осуществляли отбор проб: (а) в его центральной части под моновидовыми зарослями *H. sosnowskyi*; (б) на окраине участка, где сохранена злаково-разнотравная растительность. Пробы почв отбирали на глубину 0–20 см в 25-кратной повторности (методом конверта на 5 учётных площадках). Анализировали смешанные пробы, составленные из 25 индивидуальных.

Содержание углерода ($C_{общ.}$) и азота ($N_{общ.}$) в пробах почв и растительном материале определяли в ЦКП «Хроматография» ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН методом газовой хроматографии (ФР.1.31.2016.23502) на CHNS-O анализаторе EA 1110, «CE Instruments» (Италия). Определение концентрации в растительных пробах кислоторастворимых форм Ca, Mg, K и P выполняли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (М71 ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98) на спектрометре Spectro Ciros CCD, «SPECTRO Analytical Instruments» (Германия). Обмен-

ную кислотность (pH_{KCl}) почв определяли потенциометрически (ГОСТ 26483-85), содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – по Кирсанову в 0,2н HCl (ГОСТ Р 54650-2011); содержание обменных катионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}) – вытеснением 1М KCl с последующим атомно-эмиссионным определением на ICP Spectro Ciros CCD (ГОСТ 26487-85).

Для оценки потенциальной скорости разложения фитомассы *H. sosnowskyi* выполнили модельный лабораторный эксперимент, для которого использовали образцы почв, отобранные из бывшего пахотного горизонта (глубина 0–20 см) на ключевом участке 5 (МО ГО «Сыктывкар») в его центральной части с монодоминантным сообществом *H. sosnowskyi* (pH_{KCl} = 5,6 ед.; $C_{общ.}$ = 6,4%; $N_{общ.}$ = 0,40%) и на окраине участка с разнотравно-злаковой растительностью (pH_{KCl} = 5,8 ед.; $C_{общ.}$ = 2,8%; $N_{общ.}$ = 0,17%). В качестве растительного материала использовали надземную и подземную фитомассу *H. sosnowskyi* (центр заросли) и злаково-разнотравного сообщества (окраина залежного участка). Растительный материал измельчали до 1–2 см, для надземной части *H. sosnowskyi* готовили средние пробы из листьев, их черешков и стеблей в соотношении 1,2 : 2,1 : 1,8, для злаково-разнотравного сообщества – усредняли всю надземную массу растений. Воздушно-сухую фитомассу (2,0 г) помещали в пакеты из нейлоновой сетки и размещали между двух слоёв почвы в чашках Петри. Экспонировали в термостате (температура +28 °С, влажность почвы 60% от полной влагоёмкости) в течение 30 сут. Скорость разложения растительного материала оценивали по убыли массы и выражали в процентах от начальной массы образца. Повторность проведения опыта для каждого варианта – 5-кратная.

Достоверность различий в свойствах постагрогенных почв, формирующихся под монодоминантными зарослями *H. sosnowskyi* и разнотравно-злаковыми сообществами, оценивали на основе *T*-критерия Вилкоксона. Для оценки влияния различных факторов (почва, растительное сообщество, структурный компонент фитомассы) на скорость разложения растительного материала применяли дисперсионный анализ ANOVA. В тексте и на рисунке приведены средние арифметические значения и их стандартные отклонения.

Результаты и обсуждение

В РК интродукция *H. sosnowskyi* осуществлена в 60-е годы прошлого столетия [17]. В условиях развала сельского хозяйства (начиная с 1990-х гг. XX в.), отсутствия обработки почв пахотных угодий, контроля за посевами борщевика, этот вид, благодаря своим биологическим свойствам (высокая семенная продуктивность, отавность, функциональная пластичность) [3, 18, 19], начал активно внедряться на нарушенные территории и в постагрогенные экосистемы, постепенно образуя на них монодоминантные заросли.

Результаты проведённых нами исследований показали, что в биоклиматических условиях средней тайги *H. sosnowskyi* на залежных землях формирует в расчёте на свежую растительную массу порядка 103,6±27,8 т/га надземной (листья, черешки, стебли генеративных растений) и 32,3±6,8 т/га подземной (стеблекорни) фитомассы (или в расчёте на сухое вещество соответственно 14,5±3,9 и 7,7±1,6 т/га). Известно, что *H. sosnowskyi* достаточно чувствителен к условиям произрастания, в частности, обеспеченности почв влагой [19, 20]. При оптимальных условиях урожайность его зелёной массы может достигать в культуре 110–226 т/га [21], в естественных сообществах на Центральном Кавказе она составляет порядка 6,7 т/га сухой надземной фитомассы [22]. В агробиоклиматических условиях РК урожайность зелёной массы в посевах *H. sosnowskyi* достигала 50–100 т/га [17]. Таким образом, в постагрогенных экосистемах РК его продуктивность близка к верхней границе потенциально возможной продуктивности данного вида в культуре и существенно превосходит биологическую продуктивность надземной фитомассы растительных сообществ суходольных и пойменных лугов (2,5–4,5 т/га сухой массы).

В структуре фитомассы самоподдерживающихся в условиях залежи монодоминантных сообществ *H. sosnowskyi* ведущую роль играют надземные органы. На долю листьев с черешками приходится 42,4% общей сухой фитомассы, стеблей генеративных растений – 22,9%. Вклад подземных органов существенно ниже – 34,8%, из них 21,9% приходится на стеблекорни имматурных и виргинильных растений, 12,9% – на стеблекорни генеративных особей. Ежегодно около 78,1% фитомассы *H. sosnowskyi* (надземная часть растений и стеблекорни генеративных растений) отмирает, обеспечивая поступление в почву значительного количества (17,4 т/га) органического вещества. Следует отметить, что преобладание массы надземных органов над массой корневой системы – характерная

черта структурного состава фитомассы многих инвазионных видов [23].

Структурные компоненты фитомассы *H. sosnowskyi* существенно различаются по химическому составу (табл. 1). В листьях и черешках по сравнению со стеблями генеративных побегов выше содержание N, P, Ca, Mg и ниже – K. Следует обратить внимание на очень высокое содержание в надземной фитомассе растений, особенно в листьях и их черешках, Ca – до 45 г/кг. Подземные органы имматурных и виргинильных растений в отличие от корневой системы генеративных особей характеризуются более высокой концентрацией N и P, но уступают им по аккумуляции таких элементов, как K, Ca и Mg.

С учётом количественных параметров образующейся в постагрогенных экосистемах средней тайги фитомассы *H. sosnowskyi* в составе её органического вещества аккумулируется углерода более 9 т/га, кальция – до 500 кг/га, азота и калия – около 300 кг/га, фосфора и магния – соответственно 77 и 66 кг/га (табл. 1). Основная часть углерода и зольных элементов входит в состав надземной фитомассы и ежегодно включается в биологический круговорот вещества и энергии. В монодоминантных зарослях *H. sosnowskyi* интенсивность биологического круговорота практически полностью определяется процессами поступления и трансформации фитомассы, формируемой растениями борщевика.

Скорость трансформации растительных остатков определяется многими факторами, в первую очередь, биологической активностью и гидротермическим режимом почв, а также химическим составом органического вещества мортмассы [24]. Результаты проведённого нами модельного опыта свидетельствуют о том, что вне зависимости от свойств почвы скорость разложения фитомассы разнотравно-злакового сообщества была существенно ниже по сравнению с образцами растительной массы *H. sosnowskyi* (рис.). За 30 сут убыль фитомассы надземных и подземных органов *H. sosnowskyi* составила соответственно 45 и 65%, для образцов разнотравно-злаковой растительности данные показатели варьировали в пределах 21–25%. Различия в скорости разложения растительной массы *H. sosnowskyi* и злаково-разнотравного сообщества обусловлены, в первую очередь, особенностями их химического состава. Известно, что надземная часть *H. sosnowskyi* характеризуется высоким содержанием легко минерализуемых соединений, прежде всего, сахаров [17]. Их корневая система также содержит значительное количество лабильных, легкоокисляемых соединений, она является основным источником легкодоступного органического вещества в почвах и подвергается деструкции специфическими дрожжевыми сообществами со значительной долей видов, обладающих высокой гидролитической активностью [13]. Результаты многофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) показали, что скорость разложения органического вещества зависела от ботанического состава фитомассы (*H. sosnowskyi* × разнотравно-злаковая растительность: $F = 1111{,}5$, $p < 0{,}0001$) и типа растительного

Таблица 1 / Table 1

Содержание (г/кг) и запасы (кг/га) элементов в фитомассе *H. sosnowskyi*
Content (g/kg) and stocks (kg/ha) of elements in *H. sosnowskyi* phytomass

Элемент Chemical element	Листья и черешки растений Leaves and petioles of plants		Стебли генеративных растений Stems of generative plants		Стеблекорни имматурных и виргинильных растений Roots of immature and virginal plants		Стеблекорни генеративных растений Roots of generative plants	
	I	II	I	II	I	II	I	II
C	415±15	3915	443±16	2240	419±15	2044	429±15	1224
N	16,3±1,8	153,8	4,5±0,9	22,8	20,1±2,2	98,0	11,0±1,2	31,5
P	4,8±1,4	44,8	1,3±0,4	6,3	4,0±1,2	19,5	2,4±0,7	6,8
K	8,5±3,5	80,2	22±9	108,7	16±6	76,8	22±9	61,6
Ca	45±14	424,5	8,2±2,5	41,2	2,5±0,8	12,6	5,5±1,7	15,8
Mg	4,9±1,5	45,8	1,2±0,4	5,8	1,8±0,5	8,8	1,9±0,5	5,5

Примечание: I – содержание элемента, II – запасы элемента; ±Δ означает границы интервала абсолютной погрешности метода измерения при P ≥ 0,95.

Note: I – content of element, II – stocks of element; ±Δ means the boundaries of the interval of the absolute error of the measurement method at P ≥ 0.95

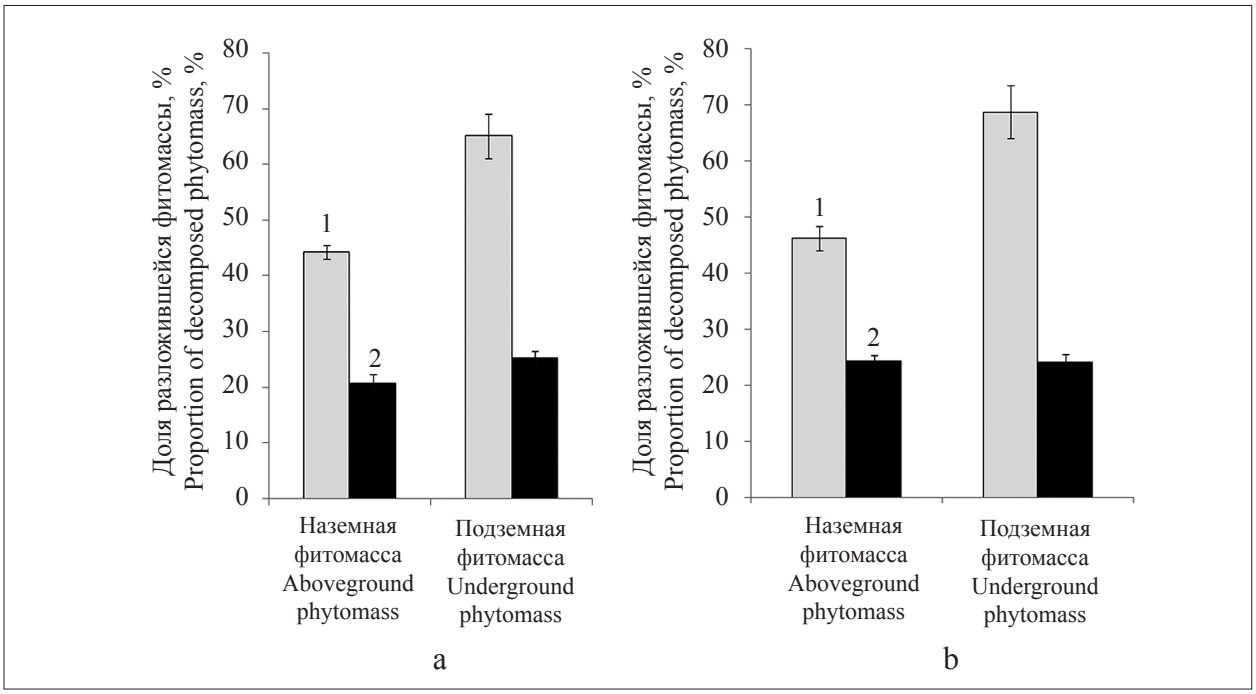


Рис. Интенсивность разложения фитомассы *Heracleum sosnowskyi* (1) и разнотравно-злакового сообщества (2) в образцах почвы (0–20 см), отобранных из центральной части залежного участка (a) и его окраины (b) / **Fig.** Intensity of decomposition of the phytomass of *Heracleum sosnowskyi* (1) and the grass-cereal community (2) in soil samples (0–20 cm) taken from the central part (a) and peripheral part (b) of the fallow area

Таблица 2 / Table 2

Физико-химические свойства верхнего горизонта постагрогенной почвы (0–20 см) залежных участков, $\bar{X} \pm \Delta$

Physicochemical properties of the upper horizon of postagrogenic soils (0–20 cm) of abandoned arable land, $\bar{X} \pm \Delta$

Номер участка Number of plot	Координаты Coordinates	pH_{KCl}, единиц units	$C_{общ.}$ C_{total}	$N_{общ.}$ N_{total}	Подвижные формы Available forms		Обменные основания Exchengeable cations	
					P_2O_5	K_2O	Ca^{2+}	Mg^{2+}
			мг/г / mg/g		мг/кг / mg/kg		смоль/кг / cmol/kg	
1	N62.2687°	5,8±0,1	29±4	2,2±0,4	351±88	174±35	8,2±0,6	2,0±0,2
	E50.6618°	5,8±0,1	35±5	2,3±0,5	682±171	284±50	10,3±0,8	2,1±0,2
2	N62.3354°	4,9±0,1	18±3	1,8±0,4	236±35	140±28	7,2±0,5	1,8±0,2
	E50.6900°	5,1±0,1	20±4	2,1±0,4	325±49	206±41	6,0±0,5	1,4±0,1
3	N62.0062°	5,1±0,1	28±4	1,8±0,4	670±167	560±112	5,7±0,4	2,1±0,2
	E50.6363°	4,6±0,1	42±6	2,2±0,4	1281±320	526±105	5,4±0,4	1,3±0,1
4	N62.7768°	4,8±0,1	26±4	2,0±0,4	324±81	137±27	8,4±0,6	2,7±0,2
	E51.1064°	5,5±0,1	49±7	3,3±0,7	688±172	132±26	12,2±0,9	2,6±0,2
5	N62.6459°	5,8±0,1	28±4	1,7±0,3	174±44	164±33	10,2±0,8	4,6±0,3
	E50.7313°	5,6±0,1	64±6	4,0±0,8	468±117	311±62	18,3±1,4	2,5±0,2
6	N62.6442°	4,3±0,1	10±2	1,0±0,2	169±42	174±35	4,3±0,4	1,2±0,1
	E50.7653°	4,8±0,1	15±4	1,3±0,3	348±87	304±61	5,6±0,4	1,1±0,1
7	N61.6658°	4,9±0,1	17±4	1,3±0,3	303±76	85±17	8,5±0,6	1,6±0,2
	E50.7611°	5,6±0,1	30±4	2,2±0,4	919±230	269±54	12,0±0,9	2,2±0,2
8	N59.6392°	4,7±0,1	13±3	1,2±0,4	129±32	165±33	7,8±0,6	1,7±0,2
	E49.3808°	4,7±0,1	21±3	1,8±0,2	240±60	333±67	10,1±0,8	2,4±0,2

Примечание. В числителе приведены значения для почв под разнотравно-злаковыми сообществами, в знаменателе – для почв под монодоминантными зарослями Heracleum sosnowskyi; $\bar{X} \pm \Delta$ – среднее арифметическое ± доверительный интервал для P = 0,95.

Note. The numerator shows the values for soils under grass–cereal community (association), in the denominator – for soils under monodominant communities of Heracleum sosnowskyi; $\bar{X} \pm \Delta$ – arithmetic mean for the sample ± confidence interval for P = 0.95.

субстрата (надземная × подземная фитомасса: $F = 129{,}4$, $p < 0{,}0001$). Свойства почвы не оказали значимого влияния на интенсивность разложения растительных образцов (почва под зарослями *H. sosnowskyi* × почва под разнотравно-злаковой растительностью: $F = 0{,}2$, $p = 0{,}697$).

Внедрение *H. sosnowskyi* в постагрогенные экосистемы, ежегодное поступление с его растительным опадом значительного количества органического материала (около 17,3 т/га сухой массы), богатого зольными элементами (табл. 1) и быстро минерализуемого почвенной микробиотой (рис.), в условиях подзоны средней тайги РК обусловливают весьма благоприятное влияние на плодородие бывших агродерново-подзолистых почв, выведенных из режима сельскохозяйственного использования. Физико-химические исследования почв ключевых участков (табл. 2) показали, что в результате экспансии *H. sosnowskyi* на залежные участки наблюдается достоверно значимое увеличение в слое 0–20 см постагрогенных почв (бывшие пахотные горизонты) содержания органического углерода (T-критерий Вилкоксона: $T = 0{,}00$, $Z = 2{,}52$, $p = 0{,}012$), азота ($T = 0{,}00$, $Z = 2{,}52$, $p = 0{,}012$), подвижных форм фосфора ($T = 0{,}00$, $Z = 2{,}52$, $p = 0{,}012$) и калия ($T = 3{,}00$, $Z = 2{,}10$, $p = 0{,}036$), обменного кальция ($T = 3{,}00$, $Z = 2{,}10$, $p = 0{,}036$). Выраженных закономерностей в изменении обменной кислотности и содержании обменных форм магния в почвах исследованных участков не установлено.

Полученные нами результаты противоречат данным [14], свидетельствующим о снижении содержания почвенного органического вещества в дерново-подзолистых почвах при внедрении *H. sosnowskyi* в разнотравно-луговые сообщества. Причины разной ответной реакции почв на вторжение инвазионных видов растений носят комплексный характер [25, 26]. Интенсивность и направленность их трансформации могут определяться как различиями экосистем в параметрах почвенного плодородия перед началом вторжения чужеродных растений [27], так и длительностью воздействия инвазионных видов на аборигенные сообщества [28]. В частности, на примере *Heracleum mantegazzianum* показано, что его экспансия в экосистемы с низким уровнем почвенного плодородия приводит к возрастанию содержания в почвах органического углерода, азота, фосфора и калия, а при изначально высоком их содержании в почвах – к их снижению [27], что может быть обусловлено интенсификацией микробиологической деятельности.

Заключение

Таким образом, впервые для Республики Коми проведено изучение продуктивности монодоминантных сообществ *Heracleum sosnowskyi*, сформированных на залежных землях после вывода пахотных угодий из сельскохозяйственного производства. Оценено влияние экспансии этого инвазивного вида на параметры почвенного плодородия постагрогенных почв. Установлено, что в биоклиматических условиях средней тайги продуктивность монодоминантных сообществ *H. sosnowskyi*, развитых на залежных землях, составляет в расчёте на зелёную массу 103,6±27,8 т/га надземных и 32,3±6,8 т/га подземных органов (или соответственно 14,5±3,9 и 7,7±1,6 т/га сухой фитомассы). Полученные данные о продуктивности самоподдерживающихся сообществ *H. sosnowskyi* в постагрогенных экосистемах Севера соответствуют урожайности этого вида в культуре и существенно превышают биопродуктивность травянистых луговых сообществ, формирующихся в регионе на пойменных и суходольных лугах. Преобладание в структуре фитомассы *H. sosnowskyi* надземных (65,3%) органов над подземными (34,8%) способствует возврату в почвы постагрогенных экосистем значительного количества быстро минерализуемого органического вещества ($C_{орг.}$ 7,4 т/га), азота (208 кг/га) и зольных элементов (847 кг/га). Это обусловливает поддержание почвенного плодородия в постагрогенных экосистемах средней тайги и сохранение на высоком уровне содержания в них почвенного углерода, азота, подвижных форм фосфора, калия и обменного кальция по сравнению с аналогичными почвами, занятыми злаково-разнотравными сообществами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Коми в рамках научного проекта № 20-44-110009 р_а «Влияние инвазии борщевика Сосновского (Heracleum sosnowskyi) на плодородие почв и состав почвенных микробных сообществ в постагрогенных экосистемах Европейского Северо-Востока (на примере средней тайги Республики Коми)», а также частично – в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (номера гос. регистрации: АААА-А17-117033010038-7 и АААА-А17-117122290011-5).

References

1. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The dynamics of carbon pools and biological activity of retic albic podzols in southern taiga during the postagrogenic evolution // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. No. 3. P. 337–351. doi: 10.1134/S1064229321030108

2. Bogdanov V.L., Nikolaev R.V., Shmeleva I.V. Invasion of an ecologically dangerous plant of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) on the territory of the European part of Russia // Regional ecology. 2011. No. 1–2 (31). P. 43–52 (in Russian).

3. Kondratiev M.N., Budarin S.N., Larikova Yu.S. Physiological and ecological mechanisms of invasive penetration of Sosnowskyi hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in unexploitable agroecosystems // Izvestiya timiryazevskoy selskohozyaystvennoy akademii. 2015. No. 2. P. 36–49 (in Russian)

4. Tovstik E.V., Adamovich T.A., Rutman V.V., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya. Identification of the thickets of *Heracleum sosnowskyi* using Earth remote sensing data // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 35–37. doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-035-037

5. Weryszko-Chmielewska E., Chwil M. Localisation of furanocoumarins in the tissues and on the surface of shoots of *Heracleum sosnowskyi* // Botany. 2017. V. 95. No. 11. P. 1057–1070. doi: 10.1139/cjb-2017-0043

6. Jaworek A.K., Michalek K., Wojas-Pelc A. Phytophotodermatitis caused by *Heracleum sosnowskyi* with erythema multiforme-like lesions // Przeglad Dermatologiczny. 2017. V. 104. No. 1. P. 16–21. doi: 10.5114/dr.2017.66218

7. Luneva N.N., Konechnaya G.Yu., Smekalova T.N., Chukhina I.G. On the status of the species Sosnovsky hogweed *Heracleum sosnowskyi* Manden. on the territory of the Russian Federation // Bulletin of plant protection. 2018. No. 3 (97). P. 10–15 (in Russian).

8. Vanderhoeven S., Dassonville N., Meerts P. Increased topsoil mineral nutrient concentrations under exotic invasive plants in Belgium // Plant and Soil. 2005. V. 275. No. 1–2. P. 169–179. doi: 10.1007/s11104-005-1257-0

9. Liao C., Peng R., Luo Y., Zhou X., Wu X., Fang C., Li B. Altered ecosystem carbon and nitrogen cycles by plant invasion: a meta-analysis // New Phytologist. 2008. V. 177. No. 3. P. 706–714. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02290

10. Weidenhamer J.D., Callaway R.M. Direct and indirect effects of invasive plants on soil chemistry and ecosystem function // J. Chem. Ecol. 2010. V. 36. No. 1. P. 59–69. doi: 10.1007/s10886-009-9735-0

11. Carey C.J., Blankinship J.C., Eviner V.T., Malmstrom C.M., Hart S.C. Invasive plants decrease microbial capacity to nitrify and denitrify compared to native California grassland communities // Biol. Invasions. 2017. V. 19. No. 10. P. 2941–2957. doi: 10.1007/s10530-017-1497-y

12. Chegodaeva N.D., Maskaeva T.A., Labutina M.V. Allelopathic influence of Sosnowsky hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) on cultivated plants // Fundamentalnye issledovaniya. 2015. No. 2–26. P. 5845–5849 (in Russian).

13. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Chernov I.Y. Soil yeast communities under the aggressive invasion of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. No. 2. P. 201–207. doi: 10.1134/S1064229315020040

14. Tovstik E.V., Shirokih I.G., Soloveva E.S., Shirokih A.A., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The change in soil actinobiote under the influence of *Heracleum sosnowskyi* invasion // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 4. P. 114–118 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-114-118

15. Matveeva E.M., Sushchuk A.A., Kalinkina D.S. Soil nematode communities under monoculture agrocenoses (example of the Republic of Karelia) // Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2015. No. 2. P. 16–32 (in Russian). doi: 10.17076/eco16

16. Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. Methodological guidelines for the study of dynamics and biological circulation in phytocenoses. Leningrad: Nauka, 1967. 143 p. (in Russian).

17. Mishurov V.P., Volkova G.A., Portnyagina N.V. Introduction of useful plants in the middle taiga subzone of the Komi Republic (Itogi raboty botanicheskogo sada za 50 let. V. 1). Sankt-Peterburg: Nauka, 1999. 216 p. (in Russian).

18. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhozhiy I.G., Malyshev R.V., Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Golovko T.K. Traits of *Heracleum sosnowskyi* plants in monostand on invaded area // PLOS ONE. 2015. V. 10. No. 11. Article No. e0142833. doi: 10.1371/journal.pone.0142833

19. Veselkin D.V., Ivanova L.A., Ivanov L.A., Mikryukova M.A., Bolshakov V.N., Betekhtina A.A. Rapid use of resources as a basis of the *Heracleum sosnowskyi* invasive syndrome // Doklady Biological Sciences. 2017. V. 473. No. 1. P. 53–56. doi: 10.1134/S0012496617020041

20. Afonin A.N., Luneva N.N., Li Y.S., Kotsareva N.V. Ecological-geographical analysis of distribution pattern and occurrence of cow-parsnip (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) with respect to area aridity and its mapping in European Russia // Russian Journal of Ecology. 2017. V. 48. No. 1. P. 86–89. doi: 10.1134/S1067413617010039

21. Satsyperova I.F. Heracleum species of the USSR – new fodder plants. Leningrad: Nauka, 1984. 223 p. (in Russian).

22. Tappeiner U., Cernusca A. Model simulation of spatial distribution of photosynthesis in structurally differing plant communities in the Central Caucasus // Ecolodgical Modellind. 1998. V. 113. No. 1–3. P. 201–223. doi: 10.1016/S0304-3800(98)00144-6

23. Kleunen M., Weber E., Fischer M. A meta-analysis of trait differences between invasive and non-invasive plant

species // Ecology letters. 2010. V. 13. No. 2. P. 235–245. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01418.x

24. Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship // Oikos. 1997. V. 79. No. 3. P. 439–449. doi: 10.2307/3546886

25. Ehrenfeld J.G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes // Ecosystems. 2003. V. 6. No. 6. P. 503–523. doi: 10.1007/s10021-002-0151-3

26. Levine J.M., Vila M., Antonio C.M.D., Dukes J.S., Grigulis K., Lavorel S. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions // Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences. 2003. V. 270. No. 1517. 775–781. doi: 10.1098/rspb.2003.2327

27. Dassonville N., Vanderhoeven S., Vanparys V., Hayez M., Gruber W., Meerts P. Impacts of alien invasive plants on soil nutrients are correlated with initial site conditions in NW Europe // Oecologia. 2008. V. 157. No. 1. P. 131–140. doi: 10.1007/s00442-008-1054-6

28. Jandová K., Klinerová T., Müllerová J., Pyšek P., Pergl J., Cajthaml T., Dostál P. Long-term impact of *Heracleum mantegazzianum* invasion on soil chemical and biological characteristics // Biology and Biochemistry. 2014. V. 68. P. 270–278. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.10.014

УДК 504.064 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-074-079

Техногенный галогенез нефтезагрязнённых почв пойменных экосистем в условиях гумидного почвообразования и его экологические последствия

© 2021. М. В. Носова[1, 2], аспирант, инженер,
В. П. Середина[1], д. б. н., профессор,
[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,
[2]АО «ТомскНИПИнефть»,
634027, Россия, г. Томск, пр. Мира, д. 72,
e-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru, seredina_v@mail.ru

В работе рассмотрены содержание легкорастворимых солей техногенного происхождения и закономерности их пространственного распределения в почвах нефтезагрязнённых пойменных экосистем Западной Сибири в пределах среднетаёжной подзоны (Томская область). Выявлены особенности процессов техногенного засоления (галогенеза), возникающих в результате эксплуатации технологических объектов нефтепромыслов (трубопроводного транспорта), несвойственных для условий гумидного почвообразования и заключающихся в появлении специфических соединений токсичных солей и признаков солончаковатости, приводящих к ухудшению плодородия почв и созданию условий, неблагоприятных для роста и развития растений. Сделан вывод о том, что обнаруженные изменения позволяют оценить экологическое состояние нефтезагрязнённых почв в районах, подверженных избыточному увлажнению (Западная Сибирь), как неудовлетворительное, и разработать комплекс научных рекомендаций по осуществлению биологического этапа рекультивации пойменных почв.

Ключевые слова: пойменные экосистемы, нефтяное загрязнение, легкорастворимые соли, техногенный галогенез.

Technogenic halogenesis of oil-contaminated soils of floodplain ecosystems under conditions of humid soil formation and its environmental consequences

© 2021. M. V. Nosova[1, 2] ORCID: 0000-0001-7985-6474,
V. P. Seredina[1] ORCID: 0000-0002-7432-1726,
[1]National Research Tomsk State University,
36, Lenina St., Tomsk, Russia, 634050,
[2]Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas Joint Stock Company,
72, Mira St., Tomsk, Russia, 634027,
e-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru, seredina_v@mail.ru

The content and patterns of spatial distribution of readily soluble salts of technogenic origin in the soils of oil-contaminated floodplain ecosystems of Western Siberia within the middle taiga subzone (Tomsk region) are considered. Peculiarities of technogenic salinization – halogenesis processes that arise as a result of the operation of oilfield technological facilities (field pipelines), are not typical for humid soil formation conditions and consist in the appearance of specific compounds of toxic salts and signs of soil salinization. It is revealed that salinization leads to deterioration of soil fertility and the creation of adverse conditions for the growth and development of plants. In the studied soils, technogenic salts are represented by compounds of the toxic salts NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$. The maximum amount of salts is recorded in the upper horizons of soils. Soils have medium salinization (at the epicenter), and weak salinization (impact zone, pollution boundary) with a sulfate type of salinity according to cationic composition, sodium type – according to anionic. The detected changes make it possible to assess the ecological state of oil-contaminated soils in areas prone to excessive moisture (Western Siberia) as unsatisfactory, and to develop a set of scientific recommendations for the implementation of the biological stage of remediation of floodplain soils. One of the scientifically based methods may be the use of rolled biomats at the final stage of biological soil remediation. This material is able to retain seeds of oil-resistant herbs, which are usually washed out by the rain from the soil, by creating a plant layer that is mature in density and area, and also isolates plants from the negative effects of toxic salts formed as a result of pollution.

Keywords: floodplain ecosystems, oil pollution, readily soluble salts, technogenic halogenesis.

Совокупность взаимодействия технологических объектов и естественных природных сред приводит к формированию природно-техногенных систем (ПТС) на территории нефтегазовых месторождений. При формировании и эксплуатации ПТС элементарного уровня (линейные и площадные объекты) происходит их воздействие на природную среду. В соответствии с исследованиями многих учёных [1–6] техногенное воздействие нефтяного загрязнения на природные экосистемы связано с геохимическими и физическими нагрузками. Первым «барьером» и центром сосредоточения всех техногенных поллютантов являются почвы. Попадая в ландшафты, нефтяные углеводороды нарушают равновесие естественных процессов, происходящих в почвах, что приводит к изменению системы почвенных параметров [5–8].

Явление накопления легкорастворимых солей отмечено на территории нефтегазовых месторождений аридных областей Восточного Прикаспия [9] и Башкирии [10]. В почвах гумидного почвообразования процессы миграции солей в момент аварийных разливов нефти, а также их вторичное (посттехногенное) перераспределение практически не изучены. Особенно эти вопросы актуальны для почв пойменных экосистем, поскольку поймы рек являются геохимическим барьером для многих веществ и химических элементов, приносимых с поверхностным стоком и грунтовыми водами из элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов.

Целью настоящего исследования является выявление особенностей техногенной трансформации почв пойменных экосистем и распределения легкорастворимых солей в условиях локального загрязнения нефтью и нефтепродуктами (НП), а также оценка экологических последствий данных изменений.

Объекты и методы исследования

Почвенно-экологическое обследование территории нефтегазовых месторождений осуществляли методом маршрутов и ключевых участков, также использовали сравнительно-географический и профильно-генетический методы анализа. Методика включала сопряжённый анализ фоновых и соответствующих им разностей загрязнённых почв. Для оценки закономерностей профильного и латерального распределения солей в загрязнённом почвенном пространстве закладывали опорные разрезы и прикопки. Выделены следующие зоны техногенной нагрузки: эпицентр загрязнения, импактная зона воздействия, граница нефтяного пятна. Морфологическими индикаторами границ ореолов загрязнения являлись наличие или отсутствие на поверхности почв битуминозной корки и визуальные признаки угнетённости растительного покрова.

В качестве фона служила незагрязнённая аллювиальная луговая обычная грунтово-глеевая тяжелосуглинистая почва [11], формирующаяся в центральной части поймы. Нефтезагрязнённые почвы определяются как хемозёмы нефтезагрязнённые по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве. Для определения профильных характеристик почв образцы отбирали по основным генетическим горизонтам, для оценки особенностей латеральной миграции солей – методом конверта в соответствии с ГОСТ 28168-89. Для выявления механизмов миграции поллютантов (НП, легкорастворимых солей) использовали материалы полевых наблюдений по 2 почвенным разрезам (глубиной до 100 см) и 26 прикопкам (глубиной до 50 см). Нефтепродукты в почве определяли флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Аналитические исследования содержания и состава легкорастворимых солей выполняли в соответствии с ГОСТ 26423-85. Математическую обработку полученных данных производили с помощью пакета программ Statistica 6.0.

Результаты и обсуждение

Почвы центральной части поймы являются главным «пунктом сбора» всех поллютантов, так как они формируются в аккумулятивных позициях ландшафта [7], поэтому сброс солесодержащих растворов на рельеф приводит к загрязнению почвенного покрова [12, 13]. Непосредственно после аварии нефть концентрируется в почвах вблизи места аварии – ядре ореола загрязнения (эпицентр). При движении потоков к краевым зонам (импактная зона и граница) интенсивность загрязнения поллютантами уменьшается как в латеральном направлении, так и в глубину по профилю почвы (рис. 1). Содержание НП в фоновых почвах ниже предела обнаружения метода.

Для верхних горизонтов (0–10 см) хемозёмов всего ореола загрязнения характерно повышенное содержание НП (табл. 1), что связано с закреплением техногенных углеводородов органическими компонентами почв, обладающими высокой нефтеёмкостью.

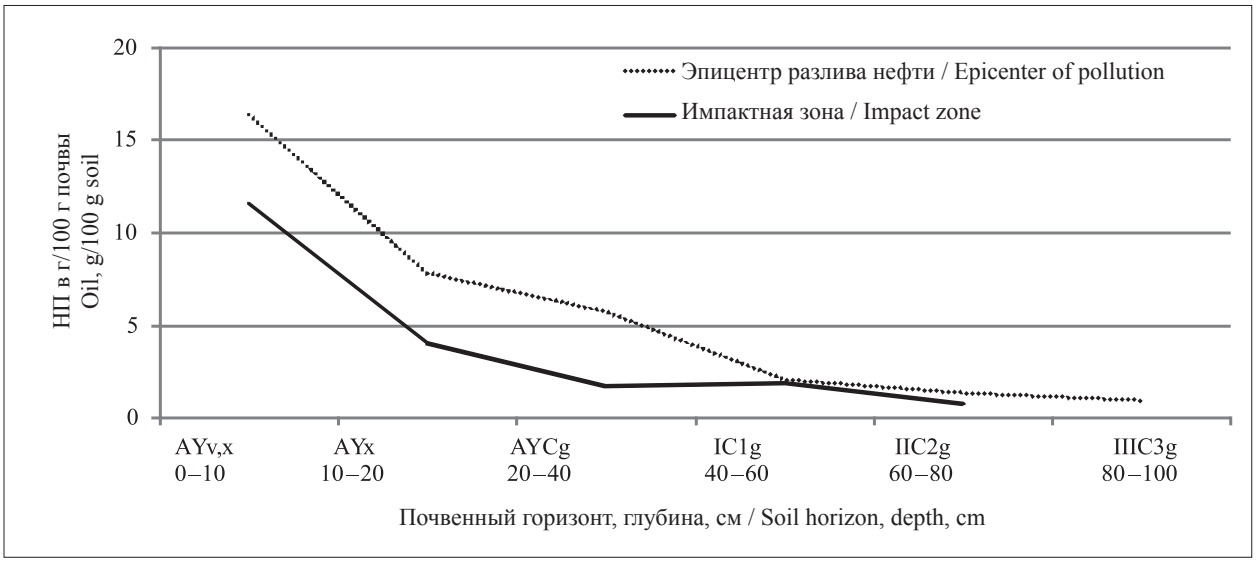


Рис. 1. Распределение нефтепродуктов в профиле нефтезагрязнённых почв (эпицентр и импактная зона загрязнения)
Fig. 1. Distribution of oil products in oil-contaminated soils (epicenter and impact zone of pollution)

Таблица 1 / Table 1
Содержание нефтепродуктов в различных зонах загрязнения / Oil content in various pollution zones

Эпицентр загрязнения Epicenter of pollution		Импактная зона Impact zone		Граница загрязнения Pollution boundary	
0–10 см /cm	10–30 см / cm	0–10 см / cm	10–30 см / cm	0–10 см / cm	10–30 см / cm
16,23–41,37 / 36,78	11,82–17,48 / 10,15	11,53–26,56 / 22,42	7,06–12,24 / 6,54	4,43–13,74 / 13,3	3,98–7,08 / 5,69

Примечание: содержание НП в г/100 г почвы (числитель – min-max, знаменатель – среднее).
Note: NP content in g/100 g of soil (numerator – min-max, denominator – mean).

Анализ достоверностей различий содержания НП в почвах различных зон загрязнения свидетельствует об их значимости ($p < 0,05$) и характеризуется минимальными отклонениями данного показателя от среднего значения. Неоднородность загрязнения связана с аккумуляцией поллютантов в микропонижениях рельефа, проникновением нефти по трещинам вдоль корневых систем растений, поровому пространству почв, а также её сорбцией в отдельных горизонтах, что определяет мозаичную, пятнистую картину загрязнения почвенного покрова.

Полевые наблюдения свидетельствуют о том, что наибольшие морфологические преобразования испытывает корнеобитаемый слой почв. В результате слипания почвенных агрегатов в твёрдую сцементированную массу на поверхности почв формируется плотная битуминозная корка мощностью 4–7 см, способствующая переувлажнению почвенного профиля, следствием которого является оглеение верхних горизонтов почв. Нижележащие горизонты более тяжёлого гранулометрического состава (IC_{1g}, IIC_{2g}) также затрудняют миграцию углеводородов по профилю, в результате чего в этих горизонтах отмечается некоторое повышение содержания НП.

Каждый разлив сырой нефти при добыче углеводородного сырья сопровождается поступлением в экосистемы легкорастворимых солей, которые в различном соотношении с органической частью нефти находятся в технологических жидкостях (буровые растворы, пластовые жидкости), что является одной из наиболее распространённых причин техногенного засоления почв.

Максимальное количество солей аккумулируется в корнеобитаемом слое почв (табл. 2).

В соответствии с общепринятой классификацией Ф.Р. Зайдельмана [14] исследованные нефтезагрязнённые почвы имеют среднюю степень засоления в эпицентре, слабую – в импактной зоне и на границе загрязнения. Тип засоления по анионному составу сульфатный, по катионному – натриевый. Главным диагностическим признаком экологического действия солей принято считать суммарное

Таблица 2 / Table 2

Солевой состав и тип засоления почв различных зон загрязнения
Salt composition and type of salinization of soils in various pollution zones

Зона загрязнения, глубина, см Contamination zone, depth, cm		Плотный остаток, % Dense residue, %	Степень засоления Salinity type	Тип засоления по анионному составу Anionic salinity type	Тип засоления по катионному составу Cationic salinity type	Сумма токсичных солей, % The amount of toxic salts,%
Эпицентр загрязнения Epicenter of pollution	0–10	0,35–1,12 / 0,54	средняя medium	сульфатный sulfate	натриевый sodium	0,28–0,33 / 0,31
	10–30	0,45–0,65 / 0,48	слабая low			0,18–0,29 / 0,26
Импактная зона Impact zone	0–10	0,45–0,55 / 0,48				0,19–0,25 / 0,22
	10–30	0,3–0,75 / 0,36				0,15–0,21 / 0,18
Граница загрязнения Pollution boundary	0–10	0,29–0,60 / 0,32				0,14–0,17 / 0,16
	10–30	0,15–0,29 / 0,24	незасолённые non-saline			0,07–0,13 / 0,09

Примечание: числитель – min-max, знаменатель – среднее значение.
Note: numerator – min-max, denominator – mean.

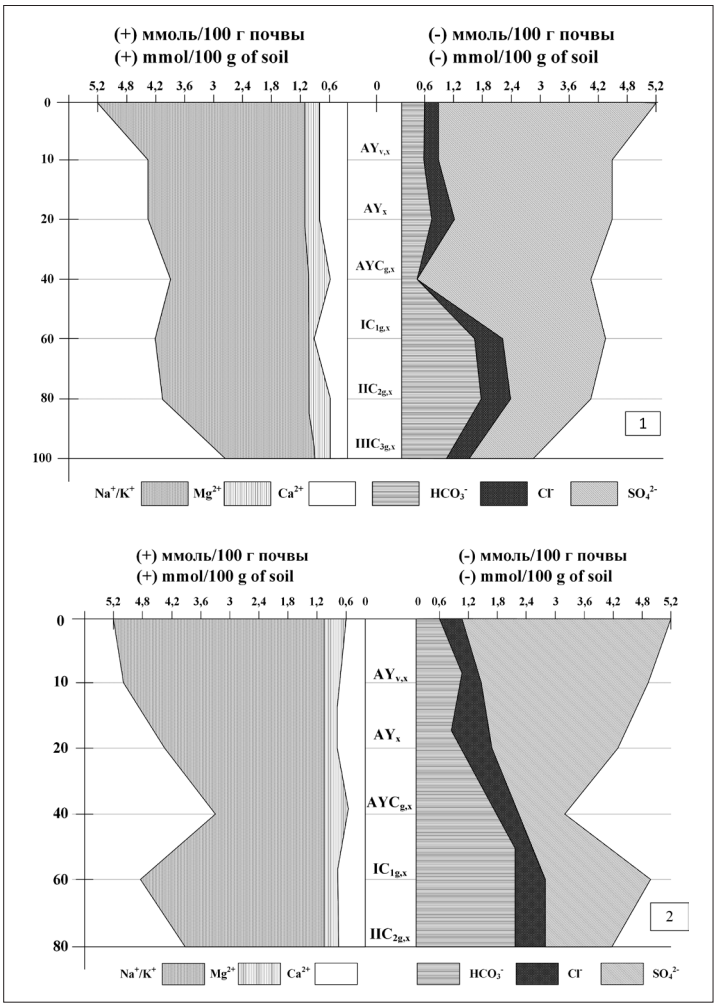


Рис. 2. Солевой профиль нефтезагрязнённых аллювиальных почв в эпицентре (1) и в импактной зоне (2) загрязнения / **Fig. 2.** Salt soil profile of oil-contaminated alluvial soils in the epicenter (1) and impact zone (2) of pollution

содержание токсичных солей. Наличие в почве легкорастворимых солей в количествах, превышающих общепринятый порог токсичности (0,15%), вызывает угнетение роста и развития растений, что является решающим фактором при проведении фитомелиоративного посева трав во время биологического этапа рекультивационных работ [15–18]. В исследованных почвах токсичные техногенные соли представлены NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$ – солями, которые могут привести к локальной гибели растительности и образованию незарастающих участков – «прогалин».

Засоление почв сочетается с повышенным содержанием НП, что определяет одну из специфических особенностей техногенного галогенеза в районах гумидного почвообразования, приводящего к формированию антропогенно-преобразованных почв, представленных битуминозными хемозёмами [11]. Результаты корреляционного анализа указывают на прямую связь между содержанием легкорастворимых солей и НП в загрязнённых почвах – коэффициент корреляции (r) составляет 0,87 (для глубины 0–10 см) и 0,83 (для глубины 10–30 см).

Внутрипочвенное движение техногенных жидкостей сопровождается фракционированием состава ионов. Минерализованные воды формируют в эпицентре загрязнения призмовидный солевой профиль (рис. 2) – соли аккумулируются в значительных количествах по всему профилю с абсолютным максимумом в верхней его части, что свидетельствует о прогрессивном засолении данной зоны. Солевой профиль почв импактной зоны загрязнения также имеет выраженный максимум накопления солей в гумусовых горизонтах и второй максимум – в горизонтах тяжёлого гранулометрического состава на глубине 60 см при общем невысоком содержании солей в остальной толще почвы. В ходе такой дифференциации почвенного профиля создаётся возможность развития сопутствующего солончакового процесса наряду с основными процессами, формирующими профиль аллювиальных почв (дернового, аллювиального, глеевого).

Таким образом, особенности пойменных ландшафтов: близкий подпор грунтовых вод, механическая суффозия, сезонная пульсация, эрозионно-аккумулятивные процессы способствуют накоплению поллютантов, приносимых с поверхностным стоком и грунтовыми водами из элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов. В этой связи загрязнение аллювиальных почв НП представляет серьёзную экологическую опасность, угрожающую распространением в природных экосистемах загрязняющих веществ и их поступлением в речную сеть. На нефтезагрязнённых участках поймы формируются новые антропогенно-преобразованные почвы (хемозёмы).

Заключение

В условиях гумидного почвообразования Западной Сибири в результате эксплуатации объектов нефтепромыслов техногенный галогенез сопровождается засолением почв легкорастворимыми солями, в составе которых значительную роль играют сульфат-ионы и ионы натрия. Факт наличия в почвенном профиле легкорастворимых солей свидетельствует о развитии начальной стадии процессов техногенного галогенеза и связанного с ним солончакового процесса – явлений, не характерных для почв гумидного почвообразования. В этой связи изучение трендов техногенной эволюции почвенного покрова, интенсивности трансформации свойств почв в зоне техногенеза необходимо как для организации их мониторинга, так и для осуществления практических действий – рекультивации нарушенных земель. Легкорастворимые соли создают токсичную обстановку для высших растений при фитомелиоративном посеве трав в ходе проведения биологического этапа восстановительных работ. Одним из научно-обоснованных способов биологической рекультивации нефтезагрязнённых почв может стать применение рулонных биоматов. Данный материал способен удерживать семена нефтестойких трав, которые обычно вымываются из почвы осадками, таким образом создавая выдержанный по густоте и площади растительный слой, а также изолируя растения от негативного влияния образовавшихся в результате загрязнения токсичных солей. Учёт и анализ последствий техногенного галогенеза аллювиальных почв позволит повысить эффективность мероприятий по сохранению их природного потенциала и выполнению почвовосстановительных работ.

References

1. Solntseva N.P. Soil evolutionary trends in the technogenesis zone // Soil Science. 2002. No. 1. P. 9–20 (in Russian).

2. Gennadiyev A.N. Oil and environment // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2016. No. 6. P. 30–39 (in Russian).

3. Zhu K., Hart W., Yang J. Remediation of petroleum-contaminated loess soil by surfactant-enhanced flushing technique // Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2005. No. 40. P. 1877–1893. doi: 10.1080/10934520500183899

4. Moldes A.B., Paradelo R., Rubinos D., DevesaRey R., Cruz J.M., Barral M.T. Ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil using biosurfactants from Lactobacillus pentosus // J. Agric. Food Chem. 2011. No. 59. P. 9443–9447. doi: 10.1021/jf201807r

5. Seredina V.P., Kolesnikova E.V., Kondykov V.A., Nepotrebnyy A.I., Ognev S.A. Features of the effect of oil pollution on soils of the middle taiga of Western Siberia // Oil industry. 2017. No. 5. P. 108–112 (in Russian). doi: 10.24887/0028-2448-2017-5-108-112

6. Seredina V.P., Sadykov M.E. Soils of oil fields in the middle taiga of Western Siberia and a predictive assessment of the danger of pollution by organic pollutants // Siberian Journal of Ecology. 2011. V. 18. No. 5. P. 617–623 (in Russian).

7. Seredina V.P., Nepotrebnyy A.I., Sadykov M.E. Property change pattern of the soils in the oily ecosystems in the humid soil-formation conditions // Vestnik KrasGAU. 2010. No. 10. P. 49–54 (in Russian).

8. Seredina V.P., Andreeva T.A, Alekseeva T.P., Burmistrova T.I, Tereshchenko N.N. Oil-contaminated soil: properties and reclamation. Tomsk: TPU Publishing House, 2006. 270 p. (in Russian).

9. Kapelkina L.P. Transformationof tundra ecosystems in oil development industrials of the North of Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 1. P. 49–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-1-049-052

10. Zavyalova N.V., Filimonov I.V., Kovtun V.A., Golipad A.N., Petrov S.V., Styazhkin K.K., Efremenko E.N., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. The main technological operations and stages of bioremediation of soils and water purification in situ // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 4. P. 34–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-033-040

11. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (in Russian).

12. Aislabie J.M., Balks M.R., Foght J.M., Waterhause E.J. Hydrocarbon spills on antarctic soils: effects and management // Environmental Science & Technology. 2004. V. 38. No. 5. P. 1265–1274. doi: 10.1021/es0305149

13. Lupachev A.V., Dey va N.F., Aladin D.Yu., Sevostyanov S.M., Demin D.V. Analysis of pollution with oil products and organochlorines of soils in the vicinity of Russian Antarctic stations// Theoretical and Applied Ecology.2017. No. 2. P. 49–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995- 4301-2017-2-049-053

14. Zaydelman F.R. Land reclamation. 4th. Moskva: KDU, 2017. 290 p. (in Russian).

15. Eckmeier E., Wiesenberg G.L.B. Short-chain n-alkanes (C_{16}– C_{20}) in ancient soil are useful molecular markers for prehistoric biomass burning // J. Archaeological Science. 2009. No. 36. P. 1590–1596. doi: 10.1016/j.jas.2009.03.021

16. Pinedo J., Ibáñez R., Lijzen J.P.A., Irabien A. Human risk assessment of contaminated soils by oil products: total TPH content versus fraction approach // Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J. 2014. V. 20. No. 5. P. 1231–1248. doi: 10.1080/10807039.2013.831264

17. Capra G.F., Ganga A., Grilli E., Vacca S., Buondonno A.A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective // J. Soils Sediments. 2015. No. 15. P. 1602–1618. doi: 10.1007/s11368-015-1110-x

18. Oil in the environment: legacies and lessons of the Exxon Valdez oil spill / Ed. J.A. Wiens. United Kingdom, Cambridge: Press Cambridge University, 2013. 482 p.

УДК 581.5:504.73.05(470.1) doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-080-089

Особенности восстановления растительности на отвалах отработанных россыпей Приполярного Урала

© 2021. С. В. Дёгтева, д. б. н., директор, зав. отделом,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167928, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: degteva@ib.komisc.ru

В статье приведены результаты многолетнего мониторинга восстановления растительности на отвалах отработанного месторождения россыпного золота в бассейне р. Кожим (Приполярный Урал). Установлено, что через 25 лет после завершения добычи золота лишь на небольшой части промышленных полигонов сформировались открытые группировки и несомкнутые растительные сообщества; значительные площади отвалов, состоящих из скелетных фракций разного размера без примеси мелкозёма, остались практически безжизненными. При зарастании элементов техногенного рельефа со временем происходит увеличение видового разнообразия сосудистых растений (до 212 видов) и мохообразных (до 27 видов). Состав растительных группировок и фитоценозов отличается значительным непостоянством. Это обусловлено не только неблагоприятными экологическими условиями, но и случайным характером заноса семян. Первичные сукцессии в течение всего периода наблюдений протекали не по зональному типу, хотя облик формирующейся растительности определяли виды-апофиты.

***Ключевые слова*:** восстановление растительности, нарушенные территории, Приполярный Урал.

Features of vegetation restoration on the dumps of spent minings of the Subpolar Urals

© 2021. S. V. Degteva ORCID: 0000-0003-3641-6123,
Institute of Biology of the Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: degteva@ib.komisc.ru

The results of long-term monitoring of vegetation restoration on the dumps of a spent gold mining in the Kozhim River basin (Circumpolar Urals) are presented. 25 years after the finishing of gold mining, only on a small part of the industrial territories open groupings and unclosed plant communities are formed. Significant areas of dumps remained practically lifeless. Biodiversity increases over time up to 212 species for vascular plants and up to 27 species for bryophytes. The composition of plant groups and phytocenoses is characterized by significant variability. This is due not only to unfavorable environmental conditions, but also to the random introduction of seeds. Primary successions during the observation period did not occur according to the zonal type, although the appearance of the emerging vegetation was determined by species of natural flora.

Keywords: restoration of vegetation, disturbed territoties, Subpolar Urals.

Исследование динамики (сукцессионных смен) фитоценозов в ландшафтах, трансформированных деятельностью человека, актуально не только с точки зрения фундаментальных проблем науки о растительности, но и для разработки рекомендаций по восстановлению нарушенных сообществ и экосистем. Изучение сукцессий различных типов проводятся достаточно активно, как в России, так и за её пределами, однако массив данных, касающихся разнообразия и динамики растительности техногенных местообитаний районов Крайнего Севера, всё ещё относительно невелик. В Республике Коми наиболее полно изучены демутационные смены растительных сообществ в равнинных ландшафтах: на вырубках [1, 2], в границах разрабатываемых месторождений углеводородного сырья [2–9]

и каменного угля [10, 11], вдоль железных и шоссейных дорог, трасс газо- и нефтепроводов [12, 13], на карьерах [10, 14, 15].

Начиная с 1980-х гг. учёными ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН проводится мониторинг восстановления растительного покрова на отвалах месторождения россыпного золота, расположенного на западном макросклоне Приполярного Урала, в бассейне р. Кожим. С 1994 г. данная территория входит в состав Национального парка «Югыд ва», уровень антропогенного пресса в настоящее время здесь минимален, добыча золота не проводится.

Цель данной работы – обобщить сведения о восстановлении растительности на различных элементах техногенного рельефа Кожимского месторождения за 25-летний период.

Объекты и методы исследований

Район исследований расположен в северо-западной части Приполярного Урала, ограниченной с юга долиной р. Косью, а с востока и севера – р. Кожим. В рельефе чередуются антиклинальные поднятия в виде хребтов Обе-из, Восточные и Западные Саледы, Малды, Росомаха и разделяющие их продольные депрессии, которые представляют собой синклинальные мульды, преобразованные позднейшими эрозионными процессами [16]. Бассейн реки Кожим относится к крайнесеверной подзоне тайги Урало-Западносибирской провинции Евразиатской таёжной области [17]. В растительном покрове выражены черты вертикальной поясности. До отметок высот 450–500 м над уровнем моря его облик определяют горные леса и редколесья, сформированные преимущественно *Larix sibirica* Ledeb. и *Picea obovata* Ledeb. Латинские названия растений приведены согласно сводке С.К. Черепанова [18]. Высотные уровни от 500 до 850 м занимают горные тундры, выше 850 м простирается пояс гольцов с небольшими фрагментами тундровых сообществ.

В процессе разработки месторождения россыпного золота в 1982–1995 гг. на промышленных площадках, а также частично на сопредельных с ними участках были уничтожены почвы и растительность, сформировались новые техногенные местообитания, экологические условия которых в большинстве случаев неблагоприятны для развития растений. В подгольцовом поясе в процессе добычи золота в долинах рек разрабатывали террасы высокого уровня. При проведении вскрышных работ до начала добычи золота и осуществлении горнотехнической рекультивации после её окончания (1988–1993 гг.) произошли большие потери потенциально плодородной пойменной фации аллювия. Вследствие этого при рекультивации отвалов их поверхность после планировки, как правило, не была засыпана слоем мелкозёма. Промышленные полигоны по окончании работ представляют собой комплекс техногенных экотопов: гряд крупновалунно-глыбового материала (галийные отвалы), «терриконов» галечно-гравийного материала с плотным и промытым песчаным наполнителем (эфельные отвалы), отвалов смешанного состава, состоящих из гальки, гравия и мелкозёма, либо (реже) валунов, гальки, гравия. Наибольшую площадь в границах полигонов занимают эфельные отвалы и отвалы смешанного состава. Еще один специфический тип техногенных экотопов – днища спущенных водоёмов-отстойников, которые сложены тонкодисперсным песчано-алеврито-глинистым материалом. Часть из них в процессе горнотехнической рекультивации была засыпана субстратом, взятым из эфельных отвалов. Отстойники, располагающиеся в непосредственной близости от русел водотоков, отграничены от них дамбами, обычно состоящими из вскрышных пород, в отдельных случаях – смешанных с галькой и гравием, реже – из эфельного материала [19].

В 1984, 1986–1990, 2010 гг. на промышленных полигонах проводили мониторинг восстановления растительности. На различных элементах техногенного рельефа и на участках, расположенных по границам промышленных полигонов, были заложены площадки размером 10 × 10 м, на которых выполняли геоботанические описания. При описаниях выявляли видовой состав сосудистых растений и мохообразных, общее проективное покрытие (ОПП), обилие отдельных видов, высоту растений. Для оценки обилия видов использовали шкалу господства В.С. Ипатова [20], предполагающую оценку степени господства вида на всей пробной площади (табл. 1). При обработке данных 219 геоботанических описаний разных лет на основании данных о встречаемости и обилии видов на пробных площадях, заложенных на разных элементах техногенного рельефа, были определены значения коэффициента участия по формуле:

$$K_y = \frac{\sum a}{n} \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{1}{8} = \frac{\sum a \cdot m}{n^2 \cdot 8},$$

где K_y – коэффициент участия вида в совокупности описаний одного для экотопа; m – число встреч вида в совокупности описаний для одного экотопа; n – число описаний для одного экотопа; a – ранг вида в каждом из описаний [20].

Результаты и обсуждение

На разных элементах техногенного рельефа складываются неодинаковые экотопические условия. Так, формирующий их субстрат отличается не только по гранулометрическому составу, но и по химическим свойствам [19]. Субстрат вскрышных отвалов по значениям аналитических показателей близок к почвам, сформировавшимся под естественными растительными сообществами. Он имеет кислую или слабокислую реакцию среды, относительно высокие показатели гидролитической кислотности. Среди катионов, определяющих обменную кислотность, доминирует алюминий, а в составе поглощённых катионов – кальций. Достаточная обеспеченность вскрышных пород доступными формами азота, а в ряде случаев – фосфора и калия, создаёт благоприятные условия для восстановления растительности. На вскрышных отвалах, так же как и на участках, граничащих с промышленными полигонами, где были уничтожены растительность и верхние горизонты почв, но не проводились горнодобывающие работы, восстановление растительного покрова протекает по типу вторичных сукцессий (демутаций).

Галийные отвалы и отвалы смешанного состава из валунов, гальки, гравия не содержат мелкозёма. Мелкозём эфелей характеризуется нейтральными или слабощелочными значениями pH, обменная и гидролитическая кислотность практически отсутствуют. Среди обменных оснований увеличивается доля ионов кальция и магния. Эти особенности связаны с наличием в составе продуктивных отложений карбонатного материала и/или карбонатных коренных подстилающих пород. Гумуса в мелкозёме эфелей мало, что создаёт дефицит азота, доступного для растений.

Свойства отложений смешанного состава (вскрышные породы с эфелями) зависят от свойств и соотношения слагающих их компонентов. Данная группа субстратов весьма разнообразна как по значению pH, так и по обеспеченности элементами минерального питания.

Материал, формирующий днища бывших водоёмов-отстойников, характеризуется слоистостью. Значения аналитических показателей меняются с глубиной. В целом субстрат имеет слабощелочную или близкую к нейтральной реакцию среды, обусловленную его карбонатностью. Содержание гумуса выше, чем в мелкозёме эфелей, что обусловлено его концентрированием в процессе седиментации с минеральной составляющей [19].

Различное положение в мезорельефе и неодинаковый гранулометрический состав субстратов техногенных экотопов обусловливают особенности режима влажности. Галийные и эфельные отвалы характеризуются провальной фильтрацией. Бывшие водоёмы-отстойники располагаются в мезопонижениях между отвалами. В зимний период здесь скапливается значительное количество снега. По этой причине, а также из-за наличия водонепроницаемого слоя под отложениями песчано-

Таблица 1 / Table 1

Шкала оценки участия видов в растительном покрове [20]
Scale of species abundance estimation in plant cover [20]

Показатель / Parameter	Оценка обилия / Abundance estimation							
Ранг / Rank	1	2	3	4	5	6	7	8
Относительное покрытие Relative coverage	до 1% up to 1%	1–5%	около 5% about 5%	5%–1/3	около 1/3 about 1/3	1/3–2/3	около 2/3 about 2/3	2/3 и больше 2/3 and more
Среднее относительное покрытие, % / Average relative coverage, %	1	2	5	19	33	50	66	83
Амплитуда относительного покрытия, % / Amplitude of relative coverage, %	до 1 up to 1	2–3	4–11	12–25	26-41	42–57	58–74	75 и больше 75 and more

Примечание: 1/3, 2/3 – доля от общего проективного покрытия.
Note: 1/3, 2/3 – the share of the total projective coverage.

алеврито-глинистого материала, субстраты днищ отстойников в течение вегетационного сезона переувлажнены. В ряде случаев в центральной части отстойников до 2010 г. сохранились временные водоёмы глубиной от 30 до 70 см. Наиболее благоприятный для растений режим влажности складывается на вскрышных отвалах, а также на отвалах смешанного состава, состоящих из материала вскрыши с примесью эфелей.

На отвалах с высокой долей скелетной фракции в субстратах наиболее контрастны перепады температуры по сезонам года. В летний период поверхность валунов, гальки и гравия, имеющая тёмно-серую окраску, нагревается больше. Зимой из-за выдувания снега субстрат здесь промерзает сильнее, чем на днищах отстойников.

Восстановление растительности в местообитаниях, сформировавшихся в процессе горнодобывающих работ, происходит по типу первичных сукцессий. Контрастные экотопические условия обусловливают их специфику на различных элементах техногенного рельефа.

Через 1–3 года после прекращения разработки полезных ископаемых на промышленных полигонах, расположенных в подгольцовом поясе (долины рек Кожим и Балбанью), было зарегистрировано 105 видов сосудистых растений и 6 видов мохообразных [21]. По прошествии 5–7 лет по окончании добычных работ видовой состав растений в техногенных экотопах насчитывал 168 таксонов сосудистых растений и 8 видов мхов [19, 22, 23].

Восстановление растительного покрова характеризовалось крайне низкими темпами. На нарушенных участках сформировались открытые группировки растений, реже – несомкнутые фитоценозы. Величина ОПП чаще составляла 5–20% и лишь в отдельных случаях превышала 40–50%. За 5 лет наблюдений, осуществляемых на постоянных пробных площадях, показатели ОПП возросли лишь на 4–15%. Была отмечена прямая зависимость видовой насыщенности и ОПП формирующейся растительности от содержания мелкозёма и доступных для растений форм азота в субстратах [19, 23]. Кроме того, процесс восстановления растительного покрова в значительной степени зависел от присутствия в субстратах семян и их заноса с сопредельных территорий. Наиболее интенсивное протекание сукцессий отмечено на нарушенных территориях, расположенных по границам промышленных полигонов, вскрышных отвалах и днищах отстойников. На эфельных отвалах регистрировали единичные экземпляры растений, галийные отвалы оставались полностью безжизненными. Наиболее значимую ценотическую роль в процессах зарастания отвалов выполняла небольшая группа травянистых растений: *Poa pratensis* L., *P. alpina* L., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Festuca ovina* L., *Calamagrostis lapponica* (Wahlenb.) C. Hartm., *Achillea millefolium* L. и некоторые др. Восстановление ценопопуляций древесных растений, доминирующих в сообществах редколесий подгольцового пояса – *Larix sibirica*, *Picea obovata*, протекало неудовлетворительно. Это было обусловлено нерегулярностью плодоношения. Более активно колонизировали отвалы кустарники: *Salix phylicifolia* L., *S. hastata* L. и *S. dasyclados* Wimm. На днищах отстойников лидирующие позиции переходили к *Equisetum arvense* L. и влаголюбивым видам: *Equisetum palustre* L., *Alopecurus aequalis* Sobol., *Polygonum humifusum* Merk ex C. Koch. В данном типе экотопов, как правило, был хорошо выражен моховой покров, образованный *Funaria hygrometrica* Hedw. и *Marchantia polymorpha* L. Кроме того, здесь было отмечено наиболее интенсивное возобновление ивы, встречались как всходы, так и молодые особи высотой до 1,0–1,3 м.

Большинство видов, характеризующихся значимыми показателями постоянства и обилия на первых этапах сингенеза растительности, относилось к числу апофитов, но не выполняло значимой роли в природных фитоценозах. Это позволило заключить, что первые этапы смен протекали не по зональному типу [19, 22, 23].

В 2010 г. на нарушенных участках отмечено увеличение видового разнообразия, зарегистрировано 212 таксонов сосудистых растений и 27 видов мхов. При этом через 25 лет после окончания горных работ растительный покров на большей части промышленных полигонов не восстановился. Установлено, что во всех типах техногенных экотопов достоверно увеличилось ОПП сосудистых растений, наиболее значимо – на вскрышных отвалах и днищах отстойников (рис.). Однако на отвалах, характеризующихся низким содержанием мелкозёма, формирование сомкнутого растительного покрова не произошло. Здесь развиты открытые маловидовые растительные группировки, в которых максимальное значение ОПП сосудистых растений составило 15%. Сходные тенденции отмечены и для напочвенного покрова. Лучше всего он развит на днищах отстойников (ОПП в среднем 37,5%), особенно

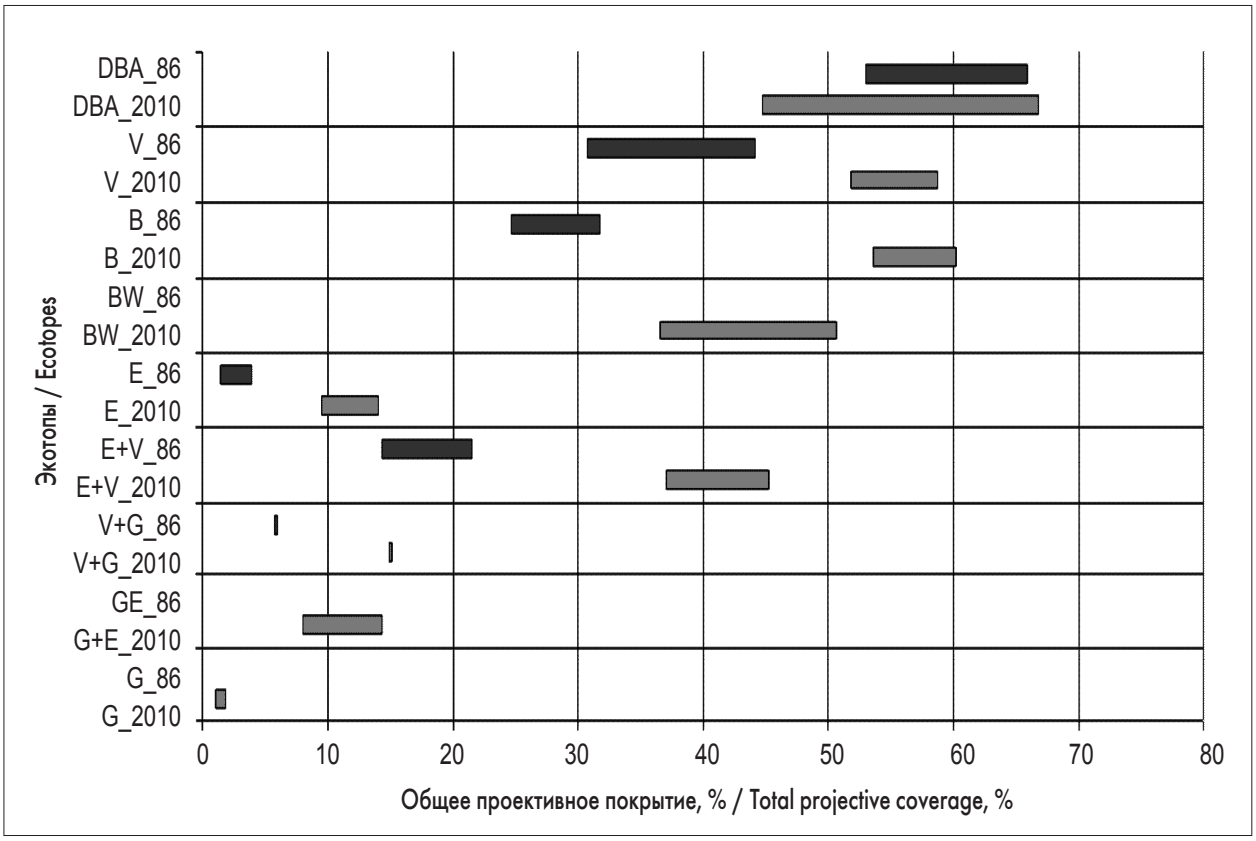


Рис. Изменение значений ОПП, % сосудистых растений (по горизонтали) в фитоценозах и растительных группировках, формирующихся в различных типах техногенных экотопов (по вертикали): DBA – нарушенные участки по границам промышленных полигонов, V – вскрышные отвалы, E+V – отвалы смешанного состава (эфели и вскрыша), E – эфельные отвалы, G – галийные отвалы, V+G – отвалы смешанного состава (вскрыша и валунно-глыбовый материал), G+E – отвалы смешанного состава (валуны, галька, гравий), B – днища водоёмов-отстойников, BW – ивняки на днищах водоёмов-отстойников.
Чёрным цветом обозначены данные 1986 г., серым цветом – данные 2010 г.
Fig. Changes in the values of total projective coverage, % of vascular plants in phytocenoses and plant groupings formed in various types of technogenic ecotopes (on vertical): DBA – disturbed areas along the borders of industrial ground, V – overburden rock dumps, E+V – dumps of mixed composition (pebbles and overburden rock), E – pebbles and gravel dumps, G – boulder dumps, V+G – dumps of mixed composition (overburden rock and boulder material), G+E – dumps of mixed composition (boulders, pebbles, gravel), B – bottoms of sedimentation ponds, BW – willow stands on the bottoms of sedimentation ponds. Data from 1986 are indicated in black, data from 2010 are indicated in gray

в сформировавшихся здесь ивняках (59,6%), а также на вскрышных отвалах (39,4%), отвалах, состоящих из смеси вскрышных пород и эфелей (25,9%). На эфельных отвалах среднее ОПП мхов составляло 7,8%, на отвалах эфелей с примесью валунов – 11,6%.

Медленнее всего протекают сукцессии на галийных отвалах, где зарегистрированы лишь накипные лишайники родов *Melanelia*, *Parmelia*, в редких случаях – налёты водорослей и единичные экземпляры сосудистых растений. Наиболее хорошо сформированные сообщества приурочены к днищам водоёмов-отстойников, занимающих на рекультивированных промышленных полигонах подчинённые площади. По их периметру обычно развиты заросли ивы (*Salix dasyclados*, *S. phylicifolia*, *S. hastata*), в которых высота полога достигает 2–5 м, а сомкнутость крон – 0,6–1,0. Ширина полосы ивняка, окаймляющего центральную часть отстойника, относительно невелика (варьирует от 1,5 до 4 м). На остальной площади днищ чаще всего встречаются сообщества с доминированием *Equisetum palustre*. В напочвенном покрове (ОПП от 5 до 90%) обычны влаголюбивые виды мхов: *Calliergon giganteum* (Schimp.) Kindb., *Calliergonella lindbergii* (Mitt.) Hedenäs, *Scorpidium cossonii* (Schimp.) Hedenäs, *Warnstorfia exannulata* (Bruch et al.). В нижней части стволов и на ветвях ивы обильны виды рода *Brachythecium* и *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske.

Проанализировано изменение ценотической роли отдельных видов сосудистых растений в процессе смен растительности в техногенных экотопах (табл. 2). Произошло заметное усиление позиций древесных растений: деревьев (*Larix sibirica*, *Betula pubescens* Ehrh.), кустарников (*Salix phylicifolia*, *S. dasyclados*, *S. hastata*, *S. glauca* L., *Betula nana* L., *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz), кустарничков (*Dryas octopetala* L., *Salix reticu-lata* L.). Установлено, что из многолетних трав высокое постоянство и обилие в большинстве типов местообитаний сохраняют или увеличивают *Festuca ovina*, *Poa alpina*, *Achillea millefolium*, *Oxytropis sordida* (Willd.) Pers., *Elymus mutabilis* (Drob.) Tzvel., *Parnassia palustris* L., *Erigeron politus* Fries, *Bromopsis pumpelliana* (Scribn.) Holub, *Solidago virgaurea* L., *Euphrasia frigida* Pugsl., *Minuartia stricta* (Sw.) Hiern., *Astragalus subpolaris* Boriss. & Schischk. Преимущественно к экотопам, субстраты которых содержат значительное количество мелкозёма, приурочены *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *Taraxacum ceratophorum* (Ledeb.) DC., *Comastoma tenellum* (Rottb.) Toyokuni, *Sanguisorba officinalis* L., *Angelica archangelica* L., *Pedicularis verticillata* L., *Botrychium lunaria* (L.) Sw., демонстрирующие здесь увеличение коэффициента участия.

На отвалах с большой долей скелетной фракции в субстратах большей ценотической значимостью отличаются *Astragalus norvegicus* Grauer, *Campanula rotundifolia* L., *Gypsophila uralensis* Less., *Papaver lapponicum* ssp. *jugoricum* (Tolm.) Tolm., *Gastrolychnis apetala* (L.) Tolm. & Kozhanczikov. Эти виды в регионе исследований обычны для горных тундр и скал. В местообитаниях с повышенной влажностью (днища отстойников) возрастают значения коэффициента участия гигрофитов: *Juncus filiformis* L., *Equisetum palustre*, *Carex cespitosa* L., *C. rostrata Stokes*, а также *Poa nemoralis* L., *Pyrola rotundifolia* L.

Одновременно отмечено снижение ценотической значимости *Poa pratensis*, *Chamaenerion angustifolium*, *Calamagrostis lapponica*, *Equisetum arvense*, занимавших на ранних этапах восстановления наиболее стабильные позиции в растительных группировках и фитоценозах, формирующихся на элементах техногенного рельефа, а также *Luzula frigida* (Buchenau) Sam., *L. parviflora* (Ehrh.) Desv., *Carex brunnescens* (Pers.) Poir., *C. arctisibirica* (Jurtz.) Czer., *Tanacetum bipinnatum* (L.) Sch. Bip., *Poa palustris* L., *Alopecurus pratensis*, *Bistorta major* S.F. Gray и др. (табл. 2).

По прошествии 25 лет в техногенных экотопах не были зафиксированы 38 видов, встречавшихся здесь ранее; одновременно впервые отмечены 85 таксонов. Все они относятся к I классу постоянства. Это, как и низкие значения коэффициента Съёренсена-Чекановского (табл. 3), свидетельствует о том, что формирующиеся на промышленных полигонах растительные группировки и сообщества отличаются значительным варьированием видового состава. Таким образом, через 25 лет после завершения разработки полезных ископаемых первичные сукцессии на элементах техногенного рельефа по-прежнему протекали не по зональному типу. Особо следует отметить, что в ряде случаев в таких местообитаниях сформировались достаточно многочисленные и устойчивые ценопопуляции редких видов (*Cypripedium calceolus* L., *Gypsophila uralensis*, *Saxifraga oppositifolia* L., *Papaver lapponicum* ssp. *jugoricum*, *Thymus talijevii* Klok. & Shost. и др.). Большинство из них относится к группе петрофитов и способно расти на отвалах отработанных россыпей, отличающихся высоким содержанием скелетной фракции в субстратах. Данные виды, принадлежащие к группе S-стратегов и характеризующиеся низкой конкурентной способностью, получают преимущества перед другими при условии поступления зачатков из ненарушенных экотопов. Их участие в процессах первичных сукцессий во многом носит случайный характер [24].

По границам промышленных полигонов, где была уничтожена естественная растительность и нарушены верхние горизонты почв, в результате вторичной сукцессии (демутации) началось восстановление древесной растительности. Здесь обычны молодняки из *Larix sibirica* с примесью *Betula pubescens*, в которых сомкнутость полога достигала в отдельных случаях 0,6–0,8, а максимальная высота деревьев – 3–4 м. Интенсивность процессов формирования растительности на этих участках значительно выше, чем в техногенных экотопах, а производные сообщества приобрели некоторые черты зональных фитоценозов. На участках, расположенных по границам промышленных полигонов и вскрышных отвалах, в 2010 г. отмечено снижение постоянства и обилия *Galium boreale* L., *Bistorta vivipara* (L.) S.F. Gray, *Dianthus superbus* L., *Chamaenerion latifolium* (L.) Holub., *Festuca rubra* L., *Artemisia tilesii* Ledeb., *Hedysarum*

Таблица 2 / Table 2

Динамика значений коэффициента участия [19] видов сосудистых растений в различных типах техногенных экотопов подгольцового пояса
Dynamics of the coefficient of participation of [19] vascular plant species in various types of technogenic ecotopes

Экотоп / Habitat	DBA		V		E+V		E		G		G+E		B		BW	
Год / Year	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010
Число описаний / Number of relevés	8	4	18	34	17	18	3	34	0	10	0	5	22	32	0	13
Деревья / Trees																
Larix sibirica	+	90,6	+	33,3	.	6,9	.	3,5	.	+	.	6,0	.	1,9	.	8,7
Picea obovata	.	9,4	.	11,2	.	7,5	.	11,4	.	6,1	.	10,0	.	1,7	.	5,3
Betula pubescens	.	7,8	+	7,0	.	6,0	.	5,0	.	1,1	.	4,5	+	1,2	.	8,9
Кустарники / Shrubs																
Salix phylicifolia	1,8	25,0	4,7	50,7	2,8	54,2	.	41,7	.	8,3	.	30,0	2,1	37,5	.	57,7
S. dasyclados	.	+	.	19,5	+	15,5	.	13,2	.	8,3	.	22,0		36,0	.	47,9
S. hastata	.	3,9	1,4	7,1	1,6	10,5	5,6	9,2	.	+	.	9,0	+	4,1	.	12,0
Betula nana	1,8	23,4	+	3,2	.	+	.	+	.	+	.	8,0		+	.	6,0
Pentaphylloides fruticosa	+	+	+	1,9	.	3,9	.	+	.	+	.	+	.	+	.	+
Кустарнички / Dwarf shrubs																
Dryas octopetala	.	6,3	+	5,6	.	16,7		36,0	.	3,1	.	60,0	.	+	.	+
Salix reticulata	+	1,6	.	1,5	.	4,5	.	3,4	.	.	.	10,0	.	1,2	.	4,4
Травянистые растения / Herbs																
Oxytropis sordida	2,0	1,6	.	4,7	+	20,5	2,8	12,8	.	5,0		22,5	.	+	.	+
Festuca ovina	8,6	65,6	38,2	60,6	44,9	77,1	70,8	62,4	.	13,1		42,5	4,8	10,2		24,6
Achillea millefolium	11,7	9,4	6,9	11,1	1,1	16,7	1,4	5,8	.	+	.	6,0	2,1	1,5	.	8,0
Poa alpina	18,8	3,1	6,6	9,6	5,2	8,5	16,7	29,4	.	11,0	.	7,5	5,6	4,9	.	5,2
Elymus mutabilis	5,3	1,6	+	10,8	+	17,8	.	2,1	.	1,1	.	2,0	+	+	.	1,8
Parnassia palustris	+	18,8	+	14,5	.	13,3	.	2,1	.	.	.	6,0	+	2,4	.	21,2
Erigeron politus	.	3,1	.	7,8	.	6,2	.	3,5	.	+	.	.	.	+	.	2,2
Bromopsis pumpelliana	+	4,7	+	5,3	+	2,7	.	1,8	.	+	.	1,0	+	+	.	+
Solidago virgaurea	3,5	4,7	+	4,7	+	5,1	1,4	+	.	+	.	+	+	+	.	1,8
Euphrasia frigida	.	3,1	.	2,1	+	3,4	.	+	.	+	.	6,0	.	+	.	5,7
Minuartia stricta	.	+	.	1,6	.	+	.	3,1	.	4,1	.	5,0	.	1,4	.	8,8
Astragalus subpolaris	+	+	+	4,4	1,0	3,2	1,4	+	.	.	.	3,0	.	+	.	+
Botrychium lunaria	.	4,7	.	1,8	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+
Deschampsia cespitosa	+	14,1	+	10,3	+	1,4	.	+	.	.	.	.	+	5,5	.	2,7
Taraxacum ceratophorum	+	7,0	+	11,1	.	1,6	.	+	.	+	.	.	.	+	.	1,5
Comastoma tenellum	+	+	.	5,5	.	4,6	.	+	.	+	.	+	.	1,7	.	3,6
Sanguisorba officinalis	10,5	3,1	+	4,9	.	4,2	.	+	.	.	.	.	+	+	.	1,2
Angelica archangelica	+	3,1	+	2,2	.	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	3,0

Экотоп / Habitat	DBA		V		E+V		E		G		G+E		B		BW	
Год / Year	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010	1986	2010
Число описаний / Number of relevés	8	4	18	34	17	18	3	34	0	10	0	5	22	32	0	13
Pedicularis verticillata	+	9,4	+	3,9	.	+	1,4	.	.	.	.	.	.	+	.	1,2
Campanula rotundifolia	+	+	+	+	.	6,5	1,4	4,0	.	1,1	.	2,0	.	+	.	+
Gypsophila uralensis	.	.	.	+	.	2,2	.	1,2	.	1,0	.	.	.	+	.	.
Astragalus norvegicus	+	.	.	+	+	1,4	.	+	.	+	.	3,0	.	+	.	+
Papaver lapponicum	.	.	.	+	+	+	.	1,9	.	5,0	.	3,0	.	.	.	.
Gastrolychnis apetala	.	+	+	+	.	+	.	+	.	8,0	.	+	+	.	.	.
Equisetum arvense	+	+	4,3	6,6	3,9	1,2	.	+	.	.	.	+	23,6	22,0	.	49,7
Equisetum palustre	.	.	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.	4,9	42,2	.	20,7
Juncus filiformis	.	.	.	1,1	.	3,7	.	1,1	.	.	.	.	+	8,5	.	14,8
Carex cespitosa	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	4,9	.	3,0
C. rostrata	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3,7	.	+
Poa nemoralis	.	.	.	+	.	+	.	.	.	+	.	.	.	+	.	3,8
Pyrola rotundifolia	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	8,3
Chamaenerion angustifolium	14,6	56,3	51,8	40,7	50,0	22,0	16,7	8,6	.	4,5	.	18,0	6,8	2,6	.	22,2
Poa pratensis	45,3	+	45,3	2,3	41,9	+	29,2	+	.	1,1	.	+	23,9	1,3	.	4,4
Calamagrostis lapponica	2,9	.	6,2	+	6,5	+	1,4	+	.	.	.	1,0	+	+	.	+
Tanacetum bipinnatum	5,5	3,1	3,5	6,2	3,5	2,4	1,4	1,2	.	+	.	4,5	2,1	+	.	3,1
Luzula frigida	1,8	12,5	12,2	3,5	6,7	+	8,3	+	.	.	.	.	+	+	.	2,2
Poa palustris	4,7	.	+	+	3,8	.	2,8	.	.	.	.	.	1,7	+	.	+
Luzula parviflora	3,1	+	4,5	+	1,6	.	1,4	.	.	.	.	2,0	.	+	.	+
Carex brunnescens	2,3	.	10,2	.	9,0	.	5,6	.	.	.	.	.	2,1	+	.	+
C. arctisibirica	+	4,7	2,2	+	8,3	+	.	.	.	.	.	1,0	2,3	+	.	+
Alopecurus pratensis	6,8	.	1,5	+	+	.	.	.	.	.	.	.	2,8	+	.	+
Bistorta major	11,7	+	+	+	1,8	.	.	.	.		.	+	.	+	.	.
Galium boreale	14,1	3,1	1,7	1,2	+	+	.	+	.	.	.	2,0	.	+	.	+
Bistorta vivipara	11,7	.	+	+	+	2,5	.	+	.	+	.	+	+	+	.	+
Dianthus superbus	8,2	+	1,7	+	+	+	.	+	.	1,1	.	.	+	+	.	+
Chamaenerion latifolium	4,1	.	1,2	.	+	+	.	+	.	.	.	3,0	.	.	.	.
Festuca rubra	4,1	.	+	+	+	+	.	.	.	+	.	.	+	+	.	+
Artemisia tilesii	3,9	.	+	+	+	3,5	.	+	.	.	.	1,5	+	+	.	.
Hedysarum arcticum	2,0	+	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	+
Aster sibiricus	1,8	+	.	+	+	3,8	.	+	.	.	.	.	.	+	.	+

Примечание. Значения коэффициента участия умножены на 100. Знак « . » обозначает отсутствие вида, «+» обозначает, что значение коэффициента участия, умноженное на 100, менее 1. Условные обозначения: см. рисунок / Note. The participation rate values are multiplied by 100. The sign “ . ” denotes the absence of the species, “+” denotes that the value of the participation rate multiplied by 100 is less than 1. For the symbols, see Figure.

Таблица 3 / Table 3

Значения коэффициентов Съёренсена-Чекановского для растительности различных экотопов
Values of the Sørensen-Chekanovsky coefficients for vegetation of various ecotopes

Экотоп / Habitat	DBA	V	E+V	E	G	G+E	B
V	38	–	–	–	–	–	–
E+V	40	41	–	–	–	–	–
E	42	41	46	–	–	–	–
G	32	29	35	53	–	–	–
G+E	34	33	37	42	41	–	–
B	38	43	41	40	30	32	–
BW	40	43	41	39	29	30	44

Примечание: значения коэффициента Съёренсена-Чекановского умножены на 100. Условные обозначения: см. рисунок.
Note: the values of the Sørensen-Chekanovsky coefficient are multiplied by 100. For the symbols, see Figure.

arcticum B. Fedtsch., *Aster sibiricus* L., *Cerastium jenisejense* Hult. Эти виды, характерные для сообществ травянистых растений, развитых на галечниковых наносах по берегам рек, могут демонстрировать увеличение значений коэффициента участия в других типах техногенных экотопов.

Заключение

При разработке месторождения россыпного золота на западном макросклоне Приполярного Урала сформировались техногенные экотопы. Большая часть из них неблагоприятна для восстановления растительности из-за низкого содержания или практически полного отсутствия мелкозёма в субстратах. Через 25 лет после завершения добычи золота лишь на небольшой части промышленных полигонов сформировались открытые группировки и несомкнутые растительные сообщества; значительные площади отвалов, состоящих из скелетных фракций разного размера без примеси мелкозёма, остались практически безжизненными. В процессе многолетнего мониторинга выявлено, что при зарастании элементов техногенного рельефа со временем происходит увеличение видового разнообразия сосудистых растений и мохообразных. Состав растительных группировок и фитоценозов отличается значительным непостоянством. Это обусловлено не только неблагоприятными экологическими условиями, но и случайным характером заноса семян. Первичные сукцессии в течение всего периода наблюдений протекали не по зональному типу, хотя облик формирующейся растительности определяли виды-апофиты. Среди наиболее ценотически значимых видов можно отметить: *Achillea millefolium*, *Elymus mutabilis*, *Festuca ovina*, *Oxytropis sordida*, *Poa alpina*; на днищах спущенных водоёмов-отстойников возрастают величины коэффициента участия гигрофитов: *Carex cespitosa*, *Carex rostrata*, *Equisetum arvense*, *E. palustre*, *Eriophorum russeolum*, *Juncus filiformis*.

Интенсивность процессов формирования растительности на нарушенных участках, сопредельных с полигонами, была значительно выше, чем в техногенных местообитаниях. Производные сообщества, развивающиеся по типу демутации, по прошествии 25 лет приобрели черты зональных фитоценозов.

Автор благодарит сотрудников отдела флоры и растительности Севера д.б.н. Г.В. Железнову за определение мхов и к.б.н. А.Б. Новаковского за помощь в статистической обработке материала.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № гос. регистрации АААА-А19-119011790022.

References

1. Degteva S.V., Zheleznova G.V., Pystina T.N., Shubina T.P. The coenotic and floral structure of the deciduous forests of the European North. Sankt-Petersburg: Nauka, 2001. 269 p. (in Russian).

2. Post-technological ecosystems of the North. Sankt-Petersburg: Nauka, 2002. 159 p. (in Russian).

3. Gruzdev B.I. Natural restoration of vegetation in the disturbed territories of the Bolshezemelskaya tundra // Biological problems of the North: Abstr. 2 All-Union Symposium. Yakutsk, 1986. P. 81 (in Russian).

4. Gruzdev B.I. Anthropogenic transformation of the species composition of plant communities of the Bolshezemelskaya tundra // Ecological and floristic study of phytocenoses of the European North. Trudy Komi filial AN USSR. 1987. No. 82. P. 58–67 (in Russian).

5. Gruzdev B.I. Dynamics of plant species composition on disturbed ecotopes of Eastern European tundras // Biodiversity of the vegetation cover of the Far North: inventory, monitoring, protection. Syktyvkar: Komi

Science Center Ural Branch of RAS, 2006. P. 18–19 (in Russian).

6. Zheleznova G.V., Kuznetsova E.G., Evdokimova T.V. Restoration of biodiversity in the process of self-overgrowth of technogenic sites on the territory of the Usinsk oil field // Biological diversity of anthropogenic transformed landscapes of the European North-East of Russia. Syktyvkar: Komi Science Center Ural Branch of RAS, 1996. P. 14–30 (in Russian).

7. Zheleznova G.V., Kuznetsova E.G., Evdokimova T.V., Turubanova L.P. Monitoring of vegetation cover formation in technogenically disturbed territories of the Usinsk oil field // Ecology. 2005. No. 4. P. 269–274 (in Russian).

8. Chalysheva L.V. Secondary succession of vegetation of technogenic landscapes of oil production areas in the European North-East // Siberian Ecological Journal. 2002. V. 9. No. 21. P. 41–45 (in Russian).

9. 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 hookeria // Vegetation of Russia. Sankt-Petersburg, 2019. No. 35. P. 77–94 (in Russian). doi: 10/31111/vegrus / 2019/35/77

10. Druzhinina O.A., Myalo E.G. Protection of the vegetation cover of the Far North: problems and prospects. Moskva: Agropromizdat, 1990. 176 p. (in Russian).

11. The natural environment of the tundra in the conditions of open-pit coal mining (on the example of the Yunyaginsky deposit). Syktyvkar, 2005. 246 p. (in Russian).

12. Akulshina N.P., Firs L.V., Shushpannikova G.S. Willow stands on the route of the Vozey-Usa-Ukhta oil trunk pipeline in the Komi ASSR // Vestnik Leningradskogo universiteta. 1988. Ser. 3. Issue 4 (No. 24). P. 24–30 (in Russian).

13. Martynenko V.A. Flora of the northern and middle taiga subzones of the European North-East: Abstract. dis. ... doct. biol. nauk. Yekaterinburg, 1996. 31 p. (in Russian).

14. Koptseva E.M., Abakumov E.V. Primary successions of vegetation and soils at quarries in the northern Taiga subzone (on the territory of the Ukhta and Sosnogorsky districts of the Komi Republic) // Vestnik St. Petersburg University. 2013. Ser. 3. Biology. No. 1. P. 28–44 (in Russian).

15. 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 // Vegetation of Russia. 2020. No. 39. P. 3–25 (in Russian). doi: 10/31111/ vegrus/2020/39/3

16. Dolgushin L.D. Some features of the relief, climate and modern denudation in the Circumpolar Urals. Moskva: Akademiya nauk SSSR, 1951. 208 p. (in Russian).

17. Isachenko T.I., Lavrenko E.M. Phytogeographical zoning // Vegetation of the Europtan part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1980. P. 10–20 (in Russian).

18. Cherepanov S.K. Vascular plants of Russia and adjacent states (within the fomer USSR). Sankt-Petersburg: Mir i sem'ya, 1995. 992 p. (in Russian).

19. Voronin R.N., Degteva S.V., Lavrenko A.N., Loskutova O.A., Martynenko V.A., Nepomilueva N.I., Pakhuchij V.V., Polezhaev N.M., Sidorov G.P., Simonov G.A., Shubina V.N., Shtejner E.I. The impact of the development of the mineral deposits in Subpolar Urals on the natural environment. Syktyvkar: Komi Science Center Ural Branch of RAS, 1994. 167 p. (in Russian).

20. Ipatov V.S., Mirin D.M. Description of phytocoenosis. Methodical recommendations. Sankt-Petersburg: Sankt-Petersburg State University, 2008. 71 p. (in Russian).

21. Martynenko V.A. Natural overgrowth of technogenic sites in the Circumpolar Urals // Botanicheskiy zhurnal. 1986. V. 71. No. 12. P. 1663–1669 (in Russian).

22. Degteva S.V. Initial stages of vegetation syngenesis at the industrial dumps of the Kozhimskoye field // Influence of anthropogenic factors on the flora and vegetation of the North. Syktyvkar: Komi Science Center Ural Branch of RAS, 1990. P. 35–45 (in Russian).

23. Degteva S.V., Rubtsov M.D., Simonov G.A. Restoration of vegetation on the dumps of placer deposits of the Circumpolar Urals // Ecology. 1991. No. 2. P. 36–44 (in Russian).

24. Poletaeva I.I., Degteva S.V., Kirillova I.A. Characteristics of cenopopulations of some rare plants on the dumps of the placer gold deposit (Circumpolar Urals) // Plant Resources. 2014. V. 50. No. 1. P. 53–66 (in Russian).

УДК 574.24 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-090-097

Влияние загрязнения воздуха на экофизиологические показатели сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в урбоэкосистемах Южной Сибири

© 2021. Н. В. Пахарькова[1], к. б. н., доцент, А. Д. Шкарубо[2], к. г. н., с. н. с., Г. А. Сорокина[1], к. б. н., доцент, Н. А. Гаевский[1], д. б. н., профессор, Ю. С. Григорьев[1], к. б. н., профессор, О. П. Калякина[1], к. х. н., доцент, А. А. Шубин[1], к. х. н., доцент, М. А. Полосухина[1], аспирант, инженер,
[1]Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10,
[2]Эстонский университет наук о жизни,
51006, Эстония, г. Тарту, ул. Креуцвалди, д. 1,
e-mail: npakharkova@sfu-kras.ru

Данная работа посвящена анализу реакции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на загрязнение воздуха в условиях города и пригорода. Одним из наиболее надёжных тестов на глубину зимнего покоя является измерение концентрации абсцизовой кислоты в хвое. Альтернативный метод определения глубины зимнего покоя основан на измерениях термоиндуцированных изменений нулевого уровня флуоресценции хлорофилла (ТИНУФ). Проведённые исследования показали, что глубина зимнего покоя *P. sylvestris* и *P. obovata* очень чувствительна к загрязнению воздуха. В загрязнённых районах, в конце зимы и ранней весной, выход из состояния покоя контролируется только низкими температурами и может быть легко вызван первыми оттепелями или даже небольшими повышениями температуры в дневное время. В такой ситуации функции фотосинтеза и транспирации полностью восстановятся, а отрицательные температуры в одну из следующих ночей приведут к повреждению и высыханию хвои. Наши данные показывают, что деревья, растущие в промышленных зонах, легче выходят из покоя и больше подвержены влиянию поздних зимних или весенних заморозков. В городских условиях риск травм от замерзания еще выше из-за ранних весенних тёплых периодов, связанных с эффектом острова тепла. Изученные параметры более стабильны для *P. sylvestris,* что говорит о том, что она менее чувствительна к загрязнению воздуха и колебаниям температуры, чем *P. obovata,* и поэтому представляет собой лучший выбор для проектов озеленения городских территорий.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris, Picea obovata,* флуоресценция хлорофилла, абсцизовая кислота.

Influence of air pollution on the ecophysiological parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Siberian spruce *Picea obovata* Ledeb.) in the urban ecosystems of Southern Siberia

© 2021. N. V. Pakharkova[1] ORCID: 0000-0003-0377-3263, **A. D. Shkaruba[2]** ORCID: 0000-0003-2536-2123, **G. A. Sorokina[1]** ORCID: 0000-0003-1758-9993, **N. A. Gaevskiy[1]** ORCID: 0000-0002-3747-9858, **Yu. S. Grigoriev[1]** ORCID: 0000-0003-4324-0728, **O. P. Kalyakina[1]** ORCID: 0000-0001-5113-6555, **A. A. Shubin[1]** ORCID: 0000-0001-9477-9809, **M. A. Polosukhina[1]** ORCID: 0000-0002-7898-819X,
[1]Siberian Federal University,
79/10, Svobodny Prospekt, Krasnoyarsk, Russia, 660041,
[2]Estonian University of Life Sciences,
1, Kreutzwaldi, Tartu, Estonia, 51006,
e-mail: npakharkova@sfu-kras.ru

This research aims towards a better understanding of the responses of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and the Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) to air pollution stress in urban and semi-urban conditions. One of the most reliable tests for the depth of winter dormancy is measuring the concentration of abscisic acid in needles. An alternative method for determining the depth of winter dormancy is based on the measurements of heat-induced changes in chlorophyll

fluorescence. Our research confirms that the depth of winter dormancy of *P. sylvestris* and *P. obovata* is highly sensitive to air pollution stress. In polluted environments, in late winter and early spring, the final release from dormancy is controlled only by low temperatures and it can be easily triggered by the first warm period or even a quick daytime thawing. Our data demonstrate that the trees growing in industrial areas are easier to release from dormancy and to be affected by late winter or spring frost. In urban environments, the risk of frost injuries is even higher due to early spring warm spells associated with the heat island effect. *P. sylvestris* is less susceptible to air pollution and temperature fluctuations than *P. obovata*, and therefore represents a better choice for urban forestry projects.

Keywords: air pollution, *Pinus sylvestris, Picea obovata*, chlorophyll fluorescence, abscisic acid.

Хвойные растения уязвимы к загрязнению воздуха [1–5], однако они широко распространены в городских лесах и парках Северной Евразии и Северной Америки. Хотя существует большая литературная база по их экологическим особенностям в урбанизированных средах [6–15], некоторые аспекты экологии хвойных растений остаются недостаточно изученными. Это такие аспекты, как взаимосвязь между загрязнением окружающей среды, фотосинтетической активностью, преждевременным прекращением зимнего покоя и последующей дефолиацией, особенно в континентальном климате.

В статье рассматривается влияние загрязнения атмосферного воздуха городов на состояние сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Pícea obovata* Ledeb.). Виды были отобраны из-за их широкого распространения в Сибири, а также и из-за их различий в экологии и уязвимости. *P. sylvestris* имеет низкую потребность в почвенной влаге и питательных веществах, её хвоя имеет ксероморфные особенности, способствующие адаптации растения к загрязнению воздуха, в то время как *P. obovata* более требовательна к экологическим условиям и, как известно, более чувствительна к воздушным токсикантам [16].

Для проведения данного исследования мы изучили фотосинтетическую активность и глубину зимнего покоя *P. sylvestris* и *P. obovata* в г. Красноярске (Россия) и его окрестностях. Город расположен в лесостепной зоне Южной Сибири. Загрязнение городской атмосферы в основном обусловлено диоксидом азота и диоксидом серы, а также бенз[а]пиреном, формальдегидом, взвешенными частицами и аммиаком [17].

Одним из наиболее надёжных методов определения глубины зимнего покоя является измерение концентрации абсцизовой кислоты (АБК) в хвое [18, 19]. Накопление АБК имеет решающее значение для растений, чтобы выжить при низких температурах в зимний период [20–22]. Из-за высокой стоимости расходных материалов, тесты АБК не доступны для многих лабораторий. Альтернативный метод определения глубины зимнего покоя основан на измерениях термоиндуцированных изменений нулевого уровня флуоресценции хлорофилла (ТИНУФ) [23–25]. Данный метод имеет несколько важных преимуществ перед тестами на основе АБК: самое главное, что он не требует химических расходных материалов и подготовки образцов, в то время как весь тест занимает всего 10 мин [25, 26]. В этом исследовании мы используем тесты АБК и ТИНУФ параллельно, что предполагает определение их сравнительной эффективности и применимости. Целью данной работы является оценка реакций сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение воздуха в условиях города и пригорода на территории Южной Сибири.

Материалы и методы исследования

Образцы хвои были собраны с 2010 по 2018 гг. на двух участках отбора проб: ПП1, расположенном на западной (подветренной) окраине г. Красноярска (56°00'11,6'' с. ш., 92°46'06,4'' в. д.), и ПП2, расположенном в северо-восточной части города (56°03'40,6'' с. ш., 92°57'37,6'' в. д.). В качестве контрольного участка использовали ПП1 с его фоновым уровнем загрязнения почвы и низким уровнем загрязнения воздуха, а в качестве экспериментального – ПП2 с интенсивным движением транспорта, а также влиянием выбросов Красноярского алюминиевого завода и несколько расположенных поблизости тепловых электростанций. Для анализа использовали одно-, двух- и трёхлетнюю хвою, собранную из средних частей крон здоровых 40-летних деревьев *P. sylvestris* и *P. obovata*. Для анализа реакции растений на загрязнение среды определяли элементный состав хвои, содержание хлорофиллов и АБК, а также кривые ТИНУФ в районах города с различным уровнем загрязнения воздуха.

Для количественного определения элементов (от Na до U в периодической таблице) промытые дистиллированной водой хвоинки высушивали, таблетировали (с добавлением борной кислоты в качестве связующего материала) [27] и анализировали методом

рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием волнового дисперсионного спектроскопа ARL Advant'X и программного обеспечения UniQuant-5.

Образцы хвои для теста АБК были собраны в декабре (период глубокого покоя) и марте (период вынужденного покоя) с 2010 по 2018 гг. Они были проанализированы методом хромато-масс-спектрометрии [28] с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1200. Хлорофилл экстрагировали из хвои ацетоном и количественно определяли спектрофотометрическим методом на приборе SPEKOL 1300 Analytik Jenna AG. Результаты были пересчитаны на сухую массу, высушивание проводили при 105 °C [29]. Температурную кривую нулевого уровня флуоресценции хлорофилла хвои регистрировали с помощью импульсно-модулированного флуориметра Junior-PAM (Walz, Германия). Хвою нагревали от 25 до 75 °C со скоростью 2,5 °C в мин с помощью нагревательного устройства, управляемого компьютером. Глубина зимнего покоя интерпретировалась через показатель *R2*, являющийся частным между амплитудами низкотемпературного (около 50 °C) и высокотемпературного (около 70 °C) максимумов нулевого уровня флуоресценции хлорофилла. Ранее доказано, что $R2 < 1$ характерен для хвои древесных растений, вошедших в состояние зимнего покоя, в то время как $R2 > 1$ указывает на то, что растения активны [26]. Результаты были обработаны с использованием полнофункционального программного обеспечения WinControl. Статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Химический состав хвои (табл.) наглядно демонстрирует различия в состоянии загрязнения воздуха в зонах отбора проб и описан в таблице. Концентрации Mg, Si, F, Al и Fe выше в хвое, собранной с ПП2.

Концентрация кальция в хвое ели последовательно выше у хвои 2- и 3-летнего

Таблица / Table

Концентрации элементов в хвое *Picea obovata* и *Pinus sylvestris*, %
Element concentrations in needles of *Picea obovata* and *Pinus sylvestris*, %

Элемент Element	Возраст хвои, лет / Age of needles, years old	*P. obovata*		*P. sylvestris*	
		ПП1 SP1	ПП2 SP2	ПП1 SP1	ПП2 SP2
K	1	35,36±0,24	35,19±0,24	25,81±0,21	30,34±0,23
	2	25,54±0,22	22,90±0,21	27,44±0,22	22,71±0,21
	3	27,15±0,22	16,66±0,19	21,72±0,19	21,40±0,20
Ca	1	40,50±0,24	31,10±0,23	41,97±0,24	30,86±0,22
	2	46,34±0,25	53,31±0,25	43,60±0,25	35,79±0,24
	3	45,85±0,25	54,01±0,25	48,08±0,25	35,60±0,25
P	1	6,88±0,13	8,73±0,14	7,58±0,11	7,98±0,12
	2	7,29±0,13	4,43±0,10	6,88±0,13	7,13±0,13
	3	6,62±0,12	4,42±0,10	6,88±0,14	5,60±0,11
Si	1	2,55±0,08	4,86±0,11	1,77±0,06	7,21±0,14
	2	3,20±0,09	5,98±0,12	1,79±0,07	10,10±0,15
	3	3,57±0,09	8,69±0,14	1,91±0,04	10,30±0,13
Mg	1	2,64±0,08	4,34±0,10	3,35±0,08	4,13±0,09
	2	2,43±0,08	3,06±0,09	3,24±0,09	4,49±0,10
	3	2,42±0,08	3,36±0,09	2,58±0,05	3,99±0,08
S	1	4,25±0,10	3,73±0,09	6,55±0,11	5,88±0,11
	2	4,43±0,10	2,94±0,08	5,71±0,12	5,64±0,11
	3	4,22±0,10	3,16±0,09	5,99±0,10	5,95±0,12
Al	1	1,17±0,05	1,83±0,07	2,54±0,06	3,25±0,09
	2	1,27±0,06	1,79±0,07	3,32±0,90	4,16±0,10
	3	1,80±0,07	2,10±0,07	2,05±0,04	4,38±0,12
Fe	1	0,77±0,04	1,68±0,06	2,34±0,05	3,59±0,10
	2	1,03±0,05	1,95±0,07	1,64±0,06	5,05±0,11
	3	1,25±0,06	2,48±0,08	2,75±0,07	4,58±0,13
F	1	1,14±0,14	3,60±0,89	не определено not detected	0,81±0,49
	2	1,36±0,24	2,39±1,22		0,61±0,33
	3	2,56±1,01	3,10±1,26	1,74±0,76	3,00±1,45

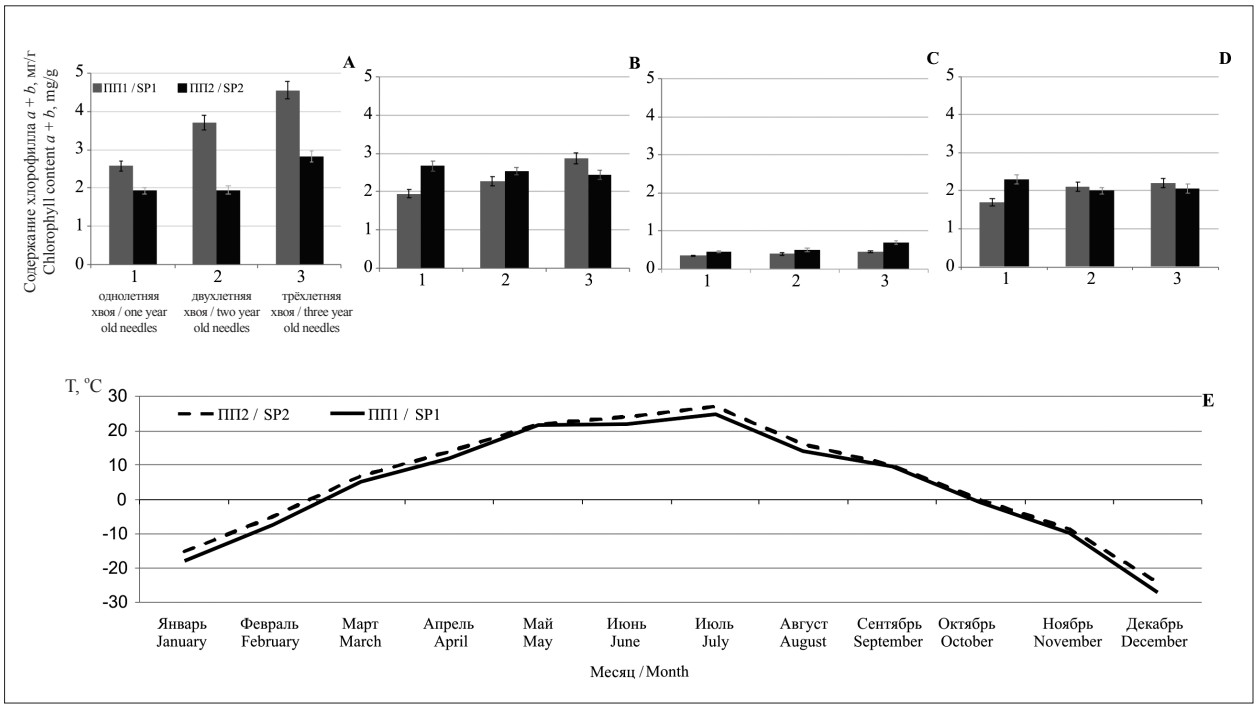


Рис. 1. Общая концентрация хлорофилла в хвое *P. sylvestris* (A – август, C – январь) и *P. obovata* (B – август, D – январь). E – температура на ПП1 и ПП2. Вертикальные линии соответствуют стандартному отклонению ($n = 3$). Для всех образцов обнаружены достоверные различия ($p < 0{,}05$) концентрации хлорофилла

Fig. 1. Total chlorophyll concentrations in needles of the *P. sylvestris* (A for August, C for January) and *P. obovata* (B for August, D for January). E – temperature in SP1 and SP2. Error bars correspond to standard deviation ($n = 3$). Significant differences ($p < 0.05$) for chlorophyll concentrations are found for all the samples

возраста, чем у более молодых: средняя разница составляет 75% на ПП2 и 13% на ПП1. Концентрация фосфора в хвое ели уменьшается с возрастом на ПП2 (в 2 раза между 1- и 3-летней хвоей), тогда как на ПП1 значения концентрации практически одинаковы во всех возрастных группах. В хвое сосны концентрации кальция и фосфора следовали той же схеме, хотя и с менее значительными различиями между молодой и зрелой хвоей. *Pinus sylvestris* обладает большей экологической пластичностью и менее уязвима к загрязнению окружающей среды, чем *Picea obovata* [30]; воздействие загрязнения воздуха на еловую хвою больше, возможно, также из-за более шероховатой поверхности хвои, удерживающей больше загрязняющих веществ [2, 31]. Это имеет серьёзные последствия для изменения фотосинтетической активности, зимнего покоя и общей жизнедеятельности этих двух видов. Низкий уровень содержания серы и фосфора в хвое ели также является надёжным индикатором загрязнения воздуха. На ПП2 концентрации последовательно ниже, чем на ПП1, что может быть связано с метаболическими нарушениями [32], особенно в сочетании с повышенной концентрацией кальция, которая известна как показатель преждевременного старения хвои в условиях загрязнения воздуха [14]. На рисунке 1 показана сезонная динамика концентраций хлорофилла в хвое ели и сосны из зон отбора проб. В летнее время хвоя *P. sylvestris* на ПП1 имела более высокий уровень хлорофилла, чем на ПП2, в то время как у *P. obovata* были примерно одинаковые уровни в обеих областях, с более высокими концентрациями, найденными в молодой хвое. Зимой хвоя *P. obovata* на ПП2 содержала больше пигментов, чем на ПП1, причём более высокие концентрации были обнаружены в хвое текущего года. Хвоя *P. sylvestris*, собранная на ПП2 зимой, также содержала больше пигментов, чем на ПП1. Зимой оба вида (в особенности *P. sylvestris*) имели в целом более низкие уровни хлорофилла по сравнению с летом, что согласуется с наблюдениями из других географических районов [33–36]. Различия в содержании хлорофилла в хвое сосны и ели на пробных площадях по возрастным группам также соответствуют этой схеме; например, повышенные уровни хлорофилла зимой на ПП2 могут возникать из-за неполного перехода хвойных деревьев в состояние зимнего

покоя, которое часто задерживается или прерывается в загрязнённых районах, особенно в случае *P. obovata*, с его в целом более слабым зимним покоем [23] и большей уязвимостью к загрязнению воздуха.

На ПП1 оба вида демонстрируют медленное, но последовательное увеличение концентрации хлорофилла от молодой до зрелой хвои (более значительное для сосны). Рисунок 2 показывает, что в декабре на ПП1 средние уровни АБК в хвое *P. sylvestris* всего на 10% выше, чем в *P. obovata*, в то время как на ПП2 эта разница достигает 30%. По сравнению с деревьями, растущими на ПП1, на ПП2 хвоя имеет более низкие уровни АБК; разница составляет 2,2 для *P. sylvestris* и 2,7 раза для *P. obovata*.

Уровни АБК снижаются с переходом хвойных деревьев из фазы глубокого покоя в фазу вынужденного покоя. В феврале на ПП1 средний уровень АБК в хвое *P. obovata* составляет 1,46 мкг/г, а в хвое *P. sylvestris* – 1,61 мкг/г; на ПП2 концентрации составляют всего 0,55 и 0,72 мкг/г. Из-за высокой изменчивости данных различия в весенний период между двумя видами и участками отбора проб не являются статистически значимыми. Из-за большей доступности тестов ТИНУФ по сравнению с АБК, мы смогли взять больше образцов и сделать больше измерений, описывающих динамику зимнего покоя. На рисунке 2 показано, что на обеих пробных площадях *P. obovata* имела более короткий зимний период покоя по сравнению с *P. sylvestris*. В то же время оба вида на ПП1 вступают в состояние зимнего покоя раньше и восстанавливаются после него позже, чем на ПП2. Однако значительных температурных различий между площадками не обнаружено (рис. 1 E).

В нашем эксперименте побеги, собранные на ПП2, выходили из состояния покоя на день раньше, чем собранные на ПП1 (*P. sylvestris* на пятый и шестой день после начала эксперимента, а *P. obovata* на четвёртый и пятый дни). Эксперимент показал, что у 3-летней хвои покой нарушался раньше, чем у более молодых. На рисунке 2 также показано, что более зрелая хвоя *P. obovata* легче выходит из покоя по сравнению с хвоей *P. sylvestris* того же возраста. Наши исследования подтверждают, что глубина зимнего покоя *P. sylvestris* и *P. obovata* очень чувствительна к загрязнению воздуха. Хвоя обоих видов, собранная до начала зимы, обычно имела более низкий уровень АБК на ПП2 по сравнению с ПП1. Измерения уровней АБК и *R*2 (рис. 2) также показывают, что, независимо от возраста, хвоя сосны и ели часто не может войти в состояние глубокого покоя под воздействием стресса загрязнения воздуха (или этот переход может быть существенно задержан и/или состояние глубокого покоя может преждевременно закончиться). В загрязнённых средах зимой и в начале весны выход из покоя контролируется только низкими температурами [33, 37], и он может быть легко вызван первыми оттепелями или даже положительными дневными температурами. В такой ситуации фотосинтетическая и транспирационная функции полностью восстановятся, а морозные условия, возвращающиеся в одну из следующих ночей, приведут к повреждению хвои и даже её усыханию.

Будучи более восприимчивым к загрязнению воздуха в целом, *P. obovata* в загрязнённых районах, по-видимому, более подвержена преждевременному прекращению зимнего покоя, чем *P. sylvestris*. Это подтверждается нашим экспериментом в лабораторных условиях, основанным на методе ТИНУФ. Проведённое исследование показало, что как АБК [21], так и ТИНУФ могут быть использованы в качестве достоверных показателей зимнего покоя *P. sylvestris* и *P. obovata* в условиях города и пригорода на территории Южной Сибири.

Однако высокие концентрации АБК также обычно связаны с условиями дефицита воды, т. е. они могут быть вызваны засухой, образованием льда, засолением почвы и т. д. [20, 38]. В результате весной отмечалась повышенная концентрация АБК в активно фотосинтезирующей хвое (рис. 2A), что может быть обусловлено физиологической засухой, вызванной потерями воды из-за транспирации и ограниченным или отсутствующим переносом воды из мёрзлой почвы. Мы также отметили высокую изменчивость уровней АБК весной, что можно объяснить, например, неравномерной инсоляцией ветвей в кронах деревьев [22].

Такие неопределённости серьёзно сдерживают эффективность диагностики на основе АБК к концу зимы, когда хвойные деревья приближаются к стадии вынужденного покоя. В климатических условиях Южной Сибири это обычно происходит в январе для *P. obovata* и в феврале для *P. sylvestris*. В загрязнённых районах выход из покоя обычно начинается примерно на неделю раньше, в лабораторных экспериментах разница составляла не более 24 ч [23]. Диагностика ТИНУФ не подвержена неопределённостям, связанным с микроклиматом побегов и уровнем локального загрязнения хвои, так как основана на

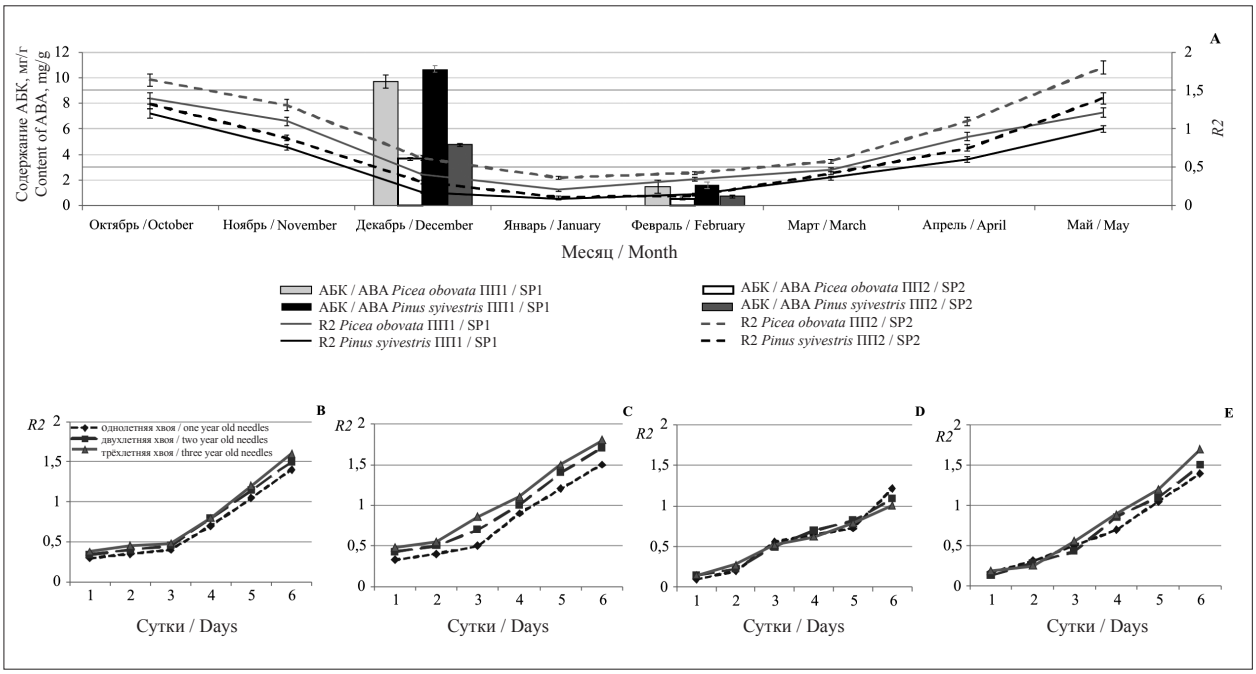


Рис. 2. Динамика *R2* и концентрации абсцизовой кислоты в хвое (в пересчёте на сухую массу). А – динамика *R2* и концентрации абсцизовой кислоты в хвое второго года жизни, вышедшей из покоя в условиях открытого грунта, показано среднеквадратичное отклонение ($n = 3$). B–E – динамика *R2* для хвои, вышедшей из покоя в лабораторных условиях (в феврале). *P. obovata*: B – незагрязнённая пригородная зона (ПП1); C – промышленная зона (ПП2). *P. sylvestris*: D – незагрязнённая пригородная зона (ПП1); E – промышленная зона (ПП2). Достоверные различия ($p < 0{,}01$) выявлены для *P. sylvestris* и *P. obovata* (декабрь)

Fig. 2 Dynamics of *R2* and concentrations of the abscisic acid in the needles (converted to the dry weight). A – Dynamics of *R2* and concentrations of the abscisic acid in second-year needles released from dormancy in outdoor conditions Error bars show the standard deviation ($n = 3$). B–E – Dynamics of *R2* for the needles released from dormancy in indoor conditions (in February). *P. obovate*: B – unpolluted periurban area (SP1); C – industrial area (SP2). *P. sylvestris*: D – unpolluted periburban area (SP1); E – industrial area (SP2). Significant differences ($p < 0.01$) are found for *P. sylvestris* and *P. obovata* (December)

структурных и физиологических свойствах фотосинтетического аппарата. Метод измерения ТИНУФ непосредственно указывает на состояние хвои, и поэтому может быть рекомендован для диагностики текущей глубины зимнего покоя, в то время как определение содержания АБК скорее количественно оценивает готовность войти в состояние покоя или нарушить его. Изменения пигментного комплекса хвои также может служить хорошим индикаторным признаком в условиях загрязнения воздушной среды, что согласуется с мнением других авторов [39].

Заключение

В климатических условиях Южной Сибири нарушение зимнего покоя при загрязнении воздуха представляет серьёзную угрозу для состояния деревьев *P. sylvestris* и *P. obovata*. Наши данные по изменению содержания АБК и параметра *R2* показывают, что глубина зимнего покоя обоих видов сильно зависит от уровня загрязнения воздуха: деревья, растущие в промышленных районах, быстрее выходят из покоя и подвергаются воздействию поздних зимних или весенних заморозков. Проведённые исследования выявили, что деревья *P. sylvestris* менее чувствительны к загрязнению воздуха и колебаниям температуры, чем *P. obovata*, поэтому представляют собой лучший выбор для проектов озеленения городских территорий.

Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 2020061906506.

References

1. Kord B., Mataji A., Babaie S. Pine (*Pinus eldarica* Medw.) needles as indicator for heavy metals pollution // International Journal of Environmental Science and Technology. 2010. No. 7. P. 79–84. doi: 10.1007/BF03326119

2. Pridacha V.B., Sazonova T.A., Talanova T.Y., Ol'chev A.V. Morphophysiological responses of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. to industrial pollution under conditions of North western Russia // Russian Journal of Ecology. 2011. V. 42. No. 1. P. 22–29. doi: 10.1134/S1067413611010073

3. Rodriguez J.H., Wannaz E.D., Pignata M.L., Fangmeier A., Franzaring J. Fluoride biomonitoring around a large aluminium smelter using foliage from different tree species // CLEAN – Soil, Air, Water. 2012. No. 40. P. 1315–1319. doi: 10.1002/clen.201100584

4. Rucandio M.I., Petit-Domínguez M.D., Fidalgo-Hijano C., García-Giménez R. Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species // Environmental Science and Pollution Research. 2011. V. 18. No. 1. P. 51–63. doi: 10.1007/s11356-010-0350-y

5. Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities // Environmental Pollution. 2011. V. 159. No. 12. P. 3560–3570. doi: 10.1016/j.envpol.2011.08.008

6. Juknys R., Vencloviene J., Stravinskiene V., Augustaitis A., Bartkevicius E. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growth and condition in a polluted environment: from decline to recovery // Environmental Pollution. 2003. V. 25. No. 2. P. 205–212. doi: 10.1016/S0269-7491(03)00070-8

7. Kayama M., Quoreshi A.M., Kitaoka S., Kitahashi Y., Sakamoto Y., Maruyama Y., Kitao M., Koike T. Effects of deicing salt on the vitality and health of two spruce species, *Picea abies* Karst., and *Picea glehnii* Masters planted along roadsides in northern Japan // Environmental Pollution. 2003. V. 124. No. 1. P. 127–137. doi: 10.1016/s0269-7491(02)00415-3

8. Kume A., Hanba Y.T., Nakane K., Sakurai N., Sakugawa H. Seasonal changes in needle water content and needle ABA concentration of Japanese red pine, *Pinus densiflora*, in declining forests on Mt. Gokurakuji, Hiroshima prefecture, Japan // Journal of Plant Research. 2006. V. 119. No. 3. P. 231–238. doi: 10.1007/s10265-006-0265-3

9. Swidrak I., Gruber A., Kofler W., Oberhuber W. Effects of environmental conditions on onset of xylem growth in *Pinus sylvestris* under drought // Tree Physiology. 2011. V. 31. No. 5. P. 483–493. doi: 10.1093/treephys/tpr034

10. Acquaviva R., Vanella L., Sorrenti V., Santangelo R., Iauk L., Russo A., Savoca F., Barbagallo I., Di Giacomo C. Biochemical modifications in *Pinus pinaster* Ait. as a result of environmental pollution // Environmental Science and Pollution Research Int. 2012. V. 19. No. 9. P. 3850–3858. doi: 10.1007/s11356-012-1030-x

11. Karolewski P., Giertych M.J., Oleksyn J., Żytkowiak R. Differential reaction of *Pinus sylvestris*, *Quercus robur* and *Q. petraea* trees to nitrogen and sulfur pollution // Water Air Soil Pollution. 2005. V. 160. No.1–4. P. 95–108. doi: 10.1007/s11270-005-3941-3

12. Wuytack T., Samson R., Wuyts K., Adriaenssens S., Kardel F., Verheyen K. Do leaf characteristics of white willow (*Salix alba* L.), northern red oak (*Quercus rubra* L.), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) respond differently to ambient air pollution and other environmental stressors? // Water Air Soil Pollution. 2013. V. 224. No. 8. P. 1635–1649. doi: 10.1007/s11270-013-1635-9

13. Wilczynski S. The variation of tree-ring widths of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) affected by air pollution // European Journal of Forest Research. 2006. V. 125. No. 3. P. 213–219. doi: 10.1007/s10342-005-0106-2

14. Liu N., Guan L.L., Sun F.F., Wen D.Z. Alterations of chemical composition, construction cost and payback time in needles of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) trees grown under pollution // Journal of Plant Research. 2014. V. 127. No. 4. P. 491–501. doi: 10.1007/s10265-014-0638-y

15. Luo Z., Sun O.J., Xu W., Ge Q., Zheng J. Phenological responses of plants to climate change in an environment // Ecological Research. 2007. V. 22 No. 3. P. 507–514. doi: 10.1007/s11284-006-0044-6

16. Mori J., Hanslin H.M., Burchi G., Saebo A. Particulate matter and element accumulation on coniferous trees at different distances from a highway // Urban Forestry & Urban Greening. 2015. V. 14. No. 1. P. 170–177. doi: 10.1016/j.ufug.2014.09.005

17. Ministry of Ecology and Environmental Management of the Krasnoyarsk Territory [Internet resource] http://krasecology.ru (Accessed: 19.04.2021).

18. Havranek W.M., Tranquillini W. Physiological processes during winter dormancy and their ecological significance // Ecophysiology of Coniferous Forests / Eds. W.K. Smith, T.M. Hinckley. USA, San Diego: Academic Press, 1995. P. 95–124. doi: 10.1016/B9780-08-092593-6.50010-4

19. Li C., Viher -Aarnio A., Puhakainen T., Junttila O., Heino P. Ecotype-dependent control of growth, dormancy and freezing tolerance under seasonal changes in *Betula pendula* Roth. // Trees. 2003. No. 17. P. 127–132. doi: 10.1007/s00468-002-0214-2

20. Duan B., Yang Y., Lu Y., Li C., Korpelainen H., Berninger F. Interactions between water deficit, ABA, and provenances in *Picea asperata* // Journal of Experimental Botany. 2007. V. 58. No. 11. P. 3025–3036. doi: 10.1093/jxb/erm160

21. Feurtado J.A., Ambrose S.J., Cutler A.J., Ross A.R.S., Abrams S.R., Kermode A.R. Dormancy termination of western white pine (*Pinus monticola* Dougl. Ex D. Don) seeds is associated with changes in abscisic acid metabolism // Planta. 2004. V. 218. No. 4. P. 630–639. doi: 10.1007/s00425-003-1139-8

22. Tanino K.K., Kalcsits L., Silim S., Kendall E., Gray G.R. Temperature-driven plasticity in growth cessation and dormancy development in deciduous woody plants: a working hypothesis suggesting how molecular and cellular function is affected by temperature during dormancy induction // Plant Molecular Biology. 2010. V. 73. No. 1–2. P. 49–65. doi: 10.1007/s11103-010-9610-y

23. Grigor'ev Y.S., Pakhar'kova N.V. Effect of industrial environmental pollution on winter dormancy in Scotch pine // Russian Journal of Ecology. 2001. No. 32. P. 437–439. doi: 10.1023/A:1012542403075

24. Pakharkova N.V., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Efremov A.A. Morphophysiological traits of needles in different climatypes of Scots pine in provenance trials // Contemporary Problems of Ecology. 2014. V. 7. No. 1. P. 84–89. doi: 10.1134/S1995425514010107

25. Pakharkova N.V., Heilmeier H., Gette I.G., Andreeva E.B., Grachev A.M., Gaevskiy N.A., Grigoriev Y.S. Quantitative characteristics of the phases of winter dormancy of conifer species at a site in Central Siberia // Revista Brasileira de Botanica. 2016. V. 39. No. 4. P. 1005–1014. doi: 10.1007/s40415-016-0298-3

26. Gaevskiy N.A., Sorokina G.A. A method for determining the depth of dormancy of woody plants // Certificate of authorship No. 1358843. Date of publication: 15.08.1987 (in Russian).

27. Arrora C.L., Bajwa M.S. Comparative study of some methods of oxidation of plant materials for elemental analysis // Current Science. 1994. V. 66. No. 4. P. 314–317.

28. Plant hormones: methods and protocols / Eds. S. Cutler, D. Bonetta. Humana Press, 2008. 152 p.

29. Lichtenthaler H.K. Chloropyll and carotinoides: Pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. No. 148. P. 331–382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

30. Ewers F.W., Schmid R. Longevity of needle fascicles of *Pinus longaeva* (Bristlecone pine) and other North American pines // Oecologia. 1981. V. 51. No. 1. P. 107–115. doi: 10.1007/BF00344660

31. Trimbacher C., Weiss P. Norway spruce: a novel method using surface characteristics and heavy metal concentrations of needles for a large-scale monitoring survey in Austria // Water Air Soil Pollution. 2004. V. 152 No. 1–4. P. 363–386. doi: 10.1023/B:WATE.0000015368.95867.02

32. Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula // Russian Journal of Ecology. 2014. V. 45. No. 2. P. 95–102. doi: 10.1134/S1067413614020088

33. Vogg G., Heirn R., Hansen J., Schafe C., Beck E. Frost hardening and photosynthetic performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. Seasonal changes in the photosynthetic apparatus and its function // Planta. 1998. V. 204. No. 2. P. 193–200. doi: 10.1007/s004250050246

34. Ottander C., Campbell D., Öquist G. Seasonal changes in photosystem II organisation and pigment composition in *Pinus sylvestris* // Planta. 1995. V. 197. No. 1. P. 176–183. doi: 0.1007/BF00239954

35. Verhoeven A.S., Adams Iii W.W., Demmig-Adams B. The xanthophyll cycle and acclimation of *Pinus ponderosa* and *Malva neglecta* to winter stress // Oecologia. 1999. V. 118. No. 3. P. 277–287. doi: 10.1007/s004420050728

36. Hansen J., Vogg G., Beck E. Assimilation, allocation and utilization of carbon by 3-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees during winter and early spring // Trees. 1996. V. 1. No. 2. P. 83–90. doi: 10.1007/PL00009659

37. Oguist G., Huner N. Photosynthesis of overwintering evergreen plants // Annual Review of Plant Biology. 2003. No. 54. P. 329–355. doi: 10.1146/annurev.arplant.54.072402.115741

38. Novikova G.V., Stepanchenko N.S., Nosov A.V., Moshkov I.E. At the beginning of the route: ABA perception and signal transduction in plants // Russian Journal of Plant Physiology. 2009. V. 56. No. 6. P. 727–741. doi: 10.1134/S1021443709060028

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

УДК 504.4.054 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-098-103

Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты в городской черте

© 2021. Т. В. Носкова[1], к. т. н., м. н. с.,
М. С. Панина[1], ведущий инженер, аспирант,
О. М. Лабузова[1], аспирант,
Т. С. Папина[1], д. х. н., начальник химико-аналитического центра,
Е. Г. Ильина[2], к. х. н., доцент,
[1]Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодёжная, д. 1,
[2]Алтайский государственный университет,
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 69,
e-mail: ntv@iwep.ru

На основании результатов флуориметрического анализа атмосферных осадков и с учётом среднегодового расхода воды рассчитана антропогенная нагрузка на природные водотоки в черте г. Барнаула (реки Обь и Барнаулка) по органическим показателям (летучие фенолы, нефтепродукты, формальдегид). Показано, что значимую антропогенную нагрузку по исследуемым веществам полноводная р. Обь в районе г. Барнаула не испытывает, и её воды способны разбавить концентрацию поступающих с городской территории изучаемых загрязняющих веществ до значений рыбохозяйственного норматива. Напротив, данные расчёта свидетельствуют, что поверхностный сток с территории г. Барнаула является существенным источником загрязнения р. Барнаулка летучими фенолами и нефтепродуктами. Особенно велик риск загрязнения р. Барнаулка фенольными соединениями, в то время как поступление формальдегида с поверхностным стоком с городской территории не вызывает опасений.

Ключевые слова: атмосферные осадки, водный объект, антропогенная нагрузка, формальдегид, летучие фенолы, нефтепродукты.

Evaluation of anthropogenic load on water bodies within the city limits

© 2021. T. V. Noskova[1] ORCID: 0000-0003-4960-8466, M. S. Panina[1] ORCID: 0000-0003-3379-7258,
O. M. Labuzova[1] ORCID: 0000-0002-5436-7479, T. S. Papina[1] ORCID: 0000-0002-8388-7289,
E. G. Ilina[2] ORCID: 0000-0001-6686-6665,
[1]Institute for Water and Environmental Problems
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Molodezhnaya St., Barnaul, Russia, 656038,
[2]Altai State University,
61, Lenina Avenue, Barnaul, Russia, 656049,
e-mail: ntv@iwep.ru

The fluorimetric analysis of the content of formaldehyde, volatile phenols and oil has been performed in the samples of atmospheric precipitation. Atmospheric precipitation (rain and snow) were collected in Barnaul from October 2013 until September 2018. The average concentration of oil in atmospheric precipitation was 0.07 ppm, volatile phenols – 0.006 ppm and formaldehyde – 0.1 ppm. A seasonal increase of the oil concentration was revealed in the cold period of the year. For formaldehyde a seasonal increase of the concentration has been revealed in the warm period of the year. Volatile phenols are characterized by a constant emission into the atmosphere of the Barnaul regardless of the time of year. The anthropogenic load of the formaldehyde, volatile phenols and oil on surface waters within the boundaries of the city of Barnaul was calculated taking into account average rivers' discharge. Full-flowing the Ob River does not experience significant anthropogenic load within the boundaries of the city of Barnaul, as regards of the studied pollutants. Its waters are able to dilute the concentration of incoming studied organic pollutants from urban stormwater runoff to before MAC. For the Barnaulka River, the stormwater runoff within the boundaries of the city of Barnaul is a serious source of pollution with oil and volatile phenols. Phenolic compounds pose especially high risk of pollution of the Barnaulka River. Contamination of the Barnaulka River with formaldehyde is not observed. For the improvement current unfavorable environmental situation, it will be necessary to construct the urban treatment plants.

Keywords: atmospheric deposition, water body, anthropogenic load, formaldehyde, volatile phenols, oil.

Одной из наиболее значимых экологических проблем современного мира является загрязнение поверхностных вод [1, 2], качество которых формируется на водосборных территориях под действием как природных, так и антропогенных факторов. Увеличение численности населения и рост промышленного производства приводит к повышению концентрации поллютантов в окружающей среде [3]. Одними из приоритетных загрязнителей, связанных с хозяйственной деятельностью человека, являются формальдегид, фенолы и нефтепродукты [4, 5]. В природные водотоки загрязняющие вещества (ЗВ) в основном попадают со сбросами сточных вод и атмосферными осадками, поступающими в водные объекты непосредственно либо диффузным путём [6, 7]. В гидрохимическом балансе речного стока и формировании химического состава поверхностных вод атмосферные осадки играют очень важную роль [8, 9], но в качестве источника загрязнения их сложно учитывать и контролировать. Тем не менее, оценка их влияния необходима для точного анализа, прогноза и регулирования качества поверхностных вод.

Цель работы: изучение содержания и сезонного распределения органических веществ (формальдегида, нефтепродуктов и летучих фенолов) в атмосферных осадках г. Барнаула для оценки степени антропогенной нагрузки на поверхностные воды в городской черте.

Объекты и методы исследования

Атмосферные осадки отбирали по возможности сразу после их выпадения (но не позже, чем спустя сутки) в период с октября 2013 г. по сентябрь 2018 г. в центре г. Барнаула на открытой площадке крыши здания Института водных и экологических проблем СО РАН. Жидкие осадки (дождевую воду) отбирали в стеклянные ёмкости вместимостью 1 дм^3 со вставленными в них стеклянными воронками, твёрдые осадки (снег) – в пластиковые контейнеры. Таяние снега проводили при комнатной температуре. За период исследования было отобрано и проанализировано 156 проб атмосферных осадков. Пробоподготовку и определение концентрации формальдегида, нефтепродуктов и летучих фенолов осуществляли согласно действующим аттестованным методикам флуориметрического анализа на приборе «Флюорат 02-3М». Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Microsoft Excel. Стандартное отклонение и доверительный интервал для среднегодовых значений исследуемых ЗВ рассчитывали при $P \geq 0{,}95$. Средневзвешенные за годовой период концентрации нефтепродуктов, летучих фенолов и формальдегида вычисляли по формуле:

$$C_g = \frac{\sum C_i \cdot V_i}{V_g}, \qquad (1)$$

где C_g – средневзвешенная концентрация ЗВ за исследуемый гидрологический год, мг/дм^3; C_i – концентрация ЗВ в единичной пробе атмосферных осадков, мг/дм^3; V_i – объём единичной пробы атмосферных осадков, дм^3; V_g – общий объём осадков за исследуемый гидрологический год, дм^3.

Результаты и обсуждение

На рисунке представлена динамика содержания исследуемых органических веществ в атмосферных осадках г. Барнаула за гидрологические годы: нефтепродукты с 01.10.13 по 30.09.18; формальдегид с 01.10.14 по 30.09.18; летучие фенолы с 01.10.13 по 30.09.17. На графиках приведены средневзвешенные значения концентраций ЗВ, учитывающие вклад каждого единичного события в содержание определяемых показателей в объединённой годовой пробе со своим статистическим весом.

Концентрации определяемых органических соединений в атмосферных осадках в течение исследуемого периода в пределах погрешности инструментального метода практически не изменяются. Это свидетельствует о стабильном потоке этих ЗВ в городскую атмосферу, что позволяет проводить долгосрочные, многолетние прогнозы антропогенной нагрузки на природные водотоки в черте г. Барнаул. Исключение составляют содержание в гидрологические годы соответствующих календарным 01.10.14–30.09.15 – нефтепродуктов и 01.10.17–30.09.18 – формальдегида, в которых наблюдается значительное снижение концентрации этих соединений.

По данным результатов анализа индивидуальных проб атмосферных осадков были рассчитаны средние и медианные значения, определены минимальная и максимальная концентрации исследуемых ЗВ для тёплого (апрель–сентябрь) и холодного (октябрь–март) периодов года, а также стандартное отклонение и доверительный интервал при доверительной вероятности $P \geq 0{,}95$. При расчёте средних значений из выборки данных

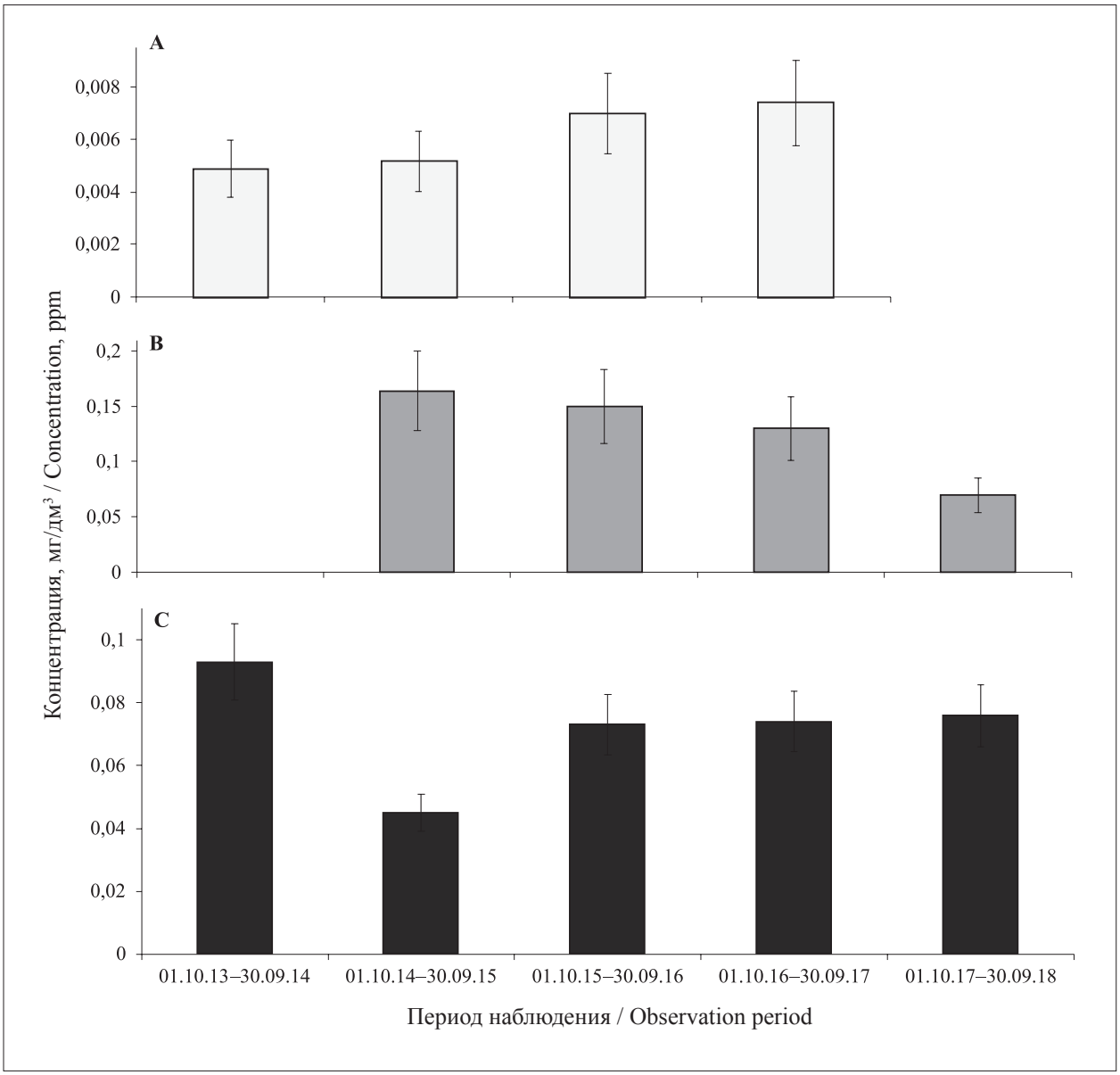


Рис. Динамика содержания летучих фенолов (A), формальдегида (B), нефтепродуктов (C) в пробах атмосферных осадков г. Барнаула в разные гидрологические годы
Fig. The dynamics of the concentration of volatile phenols (A), formaldehyde (B), oil (C) in samples of atmospheric precipitation in Barnaul in different hydrological years

Таблица 1 / Table 1

Концентрация загрязняющих веществ в атмосферных осадках г. Барнаула в тёплый и холодный периоды (2013–2018 гг.) / The concentration of pollutants in atmospheric precipitation in Barnaul during warm and cold periods (2013–2018)

Концентрация, мг/дм³ Concentration, ppm	Периоды / Periods							
	тёплый / warm				холодный / cold			
	min	max	средняя average	медиана median	min	max	средняя average	медиана median
Нефтепродукты Oil	0,01	0,11	0,045± 0,007	0,036	0,01	0,22	0,10± 0,01	0,09
Летучие фенолы Volatile phenols	0,002	0,012	0,006± 0,001	0,006	0,001	0,013	0,006± 0,002	0,007
Формальдегид Formaldehyde	0,03	0,25	0,14± 0,02	0,15	0,02	0,13	0,06± 0,02	0,08

Таблица 2 / Table 2

Средневзвешенная концентрация загрязняющих веществ в атмосферных осадках г. Барнаула, норматив для водных объектов рыбохозяйственного назначения и коэффициент антропогенной нагрузки на реки Обь и Барнаулка / Weighted average concentration of a pollutant in atmospheric precipitation in Barnaul, standard for water bodies for fishery purposes and coefficient of anthropogenic load on the Ob and Barnaulka rivers

Показатель Indicator	$C_{ср.}$, мг/дм^3 Average, ppm	ПДК$_{р.х.}$, мг/дм^3 MAC, ppm	Коэффициент антропогенной нагрузки Anthropogenic load factor	
			р. Обь the Ob River	р. Барнаулка the Barnaulka River
Нефтепродукты Oil	0,07	0,05	0,003	1,1
Летучие фенолы Volatile phenols	0,006	0,001	0,01	4,6
Формальдегид Formaldehyde	0,1	0,1	0,002	0,8

исключали пробы, значения концентрации в которых превышали величину, равную $C_{ср.} + 2y$ (где $C_{ср.}$ – средняя концентрация определяемого показателя, y – стандартное отклонение), а затем вновь рассчитывали значения для укороченной выборки данных. Результаты представлены в таблице 1.

Из представленных данных (табл. 1) следует, что наиболее высокие концентрации формальдегида соответствуют тёплому периоду года. Это можно объяснить тем, что в данное время происходит активизация фотохимических процессов, приводящих к дополнительному образованию формальдегида в атмосфере из других углеводородных соединений [10, 11]. Максимально высокие концентрации нефтепродуктов наблюдаются в течение холодного периода, что может быть связано с началом отопительного сезона, а также с более эффективной способностью снежных хлопьев удалять из атмосферы различные примеси за счёт большей площади поверхности и высокой пористости [12]. Содержание летучих фенолов в атмосферных осадках не подвержено сезонным изменениям.

Для оценки загрязняющего влияния ливневого стока дождевых и талых вод с городской территории на водные объекты (реки Обь и Барнаулка) в районе г. Барнаула использовали универсальный коэффициент антропогенной нагрузки (K'), за который принимается нормированная нагрузка отдельными ЗВ, приведённая к предельно допустимой концентрации (ПДК) этих веществ [13]. Данный коэффициент рассчитывали по формуле:

$$K' = \frac{C \cdot W}{Q \cdot ПДК}, \quad (2)$$

где C – концентрация ЗВ в атмосферных осадках, г/м^3; Q – среднегодовой водный сток реки, м^3; *ПДК* – предельно допустимая концентрация ЗВ для водных объектов рыбохозяйственного назначения (ПДК$_{р.х.}$), к которым относится р. Обь и её притоки в черте г. Барнаула, и, в частности, р. Барнаулка, г/м^3; W – среднегодовой объём поверхностного стока, м^3.

Для вычисления среднегодового объёма поверхностного стока были использованы рекомендации по расчёту систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий [14]. Среднегодовой объём поверхностного стока (W) – сумма среднегодового стока дождевых ($W_Д$, м^3) и талых ($W_Т$, м^3) вод, которые рассчитывали по следующим формулам:

$$W_Т = 10 \cdot H_Т \cdot \Psi_Т \cdot F, \quad (3)$$

$$W_Д = 10 \cdot H_Д \cdot \Psi_Д \cdot F, \quad (4)$$

где 10 – переводной коэффициент; F – общая площадь стока, га (площадь г. Барнаула, равняется 32200 га); $H_Д$ и $H_Т$ – количество осадков за тёплый и холодный период года соответственно, мм; $\Psi_Т$ и $\Psi_Д$ – общие коэффициенты стока талых и дождевых вод, равные 0,6 и 0,7 [14].

В таблице 2 представлены данные расчёта антропогенной нагрузки на поверхностные воды рек Обь и Барнаулка в черте г. Барнаула. При коэффициенте антропогенной нагрузки $K' < 1$ водоток в состоянии разбавить поступающее ЗВ и уменьшить его концентрацию до значений ниже ПДК$_{р.х.}$, при $K' > 1$ на водоток будет оказываться повышенная антропогенная нагрузка, что может негативно повлиять на экологическое состояние водного объекта.

Как следует из таблицы 2, средневзвешенная за исследуемый период концентрация ЗВ

в атмосферных осадках сопоставима, либо превышает нормативы, принятые для поверхностных вод в городской черте. Тем не менее, поверхностный сток с территории г. Барнаула не несёт ощутимой угрозы загрязнения р. Обь нефтепродуктами, формальдегидом и летучими фенолами. Коэффициент антропогенной нагрузки по исследуемым веществам значительно ниже единицы. Вследствие своей полноводности и хорошей разбавляющей способности р. Обь справляется с загрязнением, поступающим с ливневым стоком с территории г. Барнаула. Однако существенную антропогенную нагрузку испытывает малая по расходу воды р. Барнаулка, что также подтверждается данными многих гидрохимических и гидробиологических исследований [15–19]. Особенно велик риск загрязнения нефтепродуктами и фенолами, которые долгие годы являются наиболее распространёнными и опасными ЗВ поверхностных вод реки [20].

Принимая во внимание сезонное изменение концентрации ЗВ и учитывая, что основное питание сибирских рек составляют талые воды, очевидно, что в период снеготаяния с городской территории в р. Барнаулка поступят максимально высокие концентрации нефтепродуктов и фенолов, аккумулированных в снежном покрове в течение холодного периода года. Загрязнение р. Барнаулка формальдегидом не вызывает опасений, к тому же наблюдается тенденция уменьшения его содержания в городских атмосферных осадках (рис.), формирующих поверхностный сток с территории г. Барнаула.

Заключение

Для нефтепродуктов и формальдегида отмечено сезонное изменение концентрации в атмосферных осадках. Постоянная эмиссия летучих фенолов в воздушную среду г. Барнаула наблюдается в течение всего года. Вследствие того, что основное питание рек континентального климата составляют талые воды, более высокую степень загрязнения водных объектов следует ожидать в период снеготаяния.

Однако, в районе г. Барнаула р. Обь не испытывает значимой антропогенной нагрузки ($K' < 1$) по содержанию нефтепродуктов, летучих фенолов и формальдегида. Её воды способны разбавить высокие концентрации данных ЗВ, поступающих с городской территории до значений рыбохозяйственного норматива.

Для р. Барнаулка коэффициент антропогенной нагрузки, как для нефтепродуктов, так и для летучих фенолов выше единицы, что свидетельствует о загрязнении реки этими веществами в черте г. Барнаула. Особенно велик риск загрязнения реки фенольными соединениями. Для устранения сложившейся неблагоприятной экологической ситуации необходимо строительство городской сети ливневой канализации и очистных сооружений, эффективно справляющихся с очисткой дождевых и талых вод от высоких концентраций нефтепродуктов и фенолов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

References

1. Chaudhry F.N., Malik M.F. Factors affecting water pollution: a review // J. Ecosyst Ecography. 2017. V. 7. No. 1. P. 1–3. doi: 10.4172/2157-7625.1000225

2. Kramer K. J. M., Sleeuwaert F., Engelen G., Muller C., Brack W., Posthuma L. The RiBaTox web tool: selecting methods to assess and manage the diverse problem of chemical pollution in surface waters // Environmental Sciences Europe. 2019. V. 31. No. 68. P. 1–5. doi: 10.1186/s12302-019-0244-7

3. Bunke D., Moritz S., Brack W., Herraez D.L., Posthuma L., Nuss M. Developments in society and implications for emerging pollutants in the aquatic environment // Environmental Sciences Europe. 2019. V. 31. No. 32. P. 1–17. doi: 10.1186/s12302-019-0213-1

4. Bezuglaya E.Y., Ivleva T.P., Smirnova I.V. Fifty years to the air pollution observations // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. V. 38. No. 9. P. 645–652. doi: 10.3103/S1068373913090082

5. Tyrkov A.G., Velikorodov A.V., Serebryakov O.I., Nosachev S.B., Kovalev V.B. The environmental evaluation of the content of petroleum products, phenols and heavy metals in water and soil of the Caspian Sea region // Geologiya. Geografiya i global'naya ehnergiya. 2018. No. 1 (68). P. 28–34 (in Russian).

6. Zhi X., Chen L., Shen Z. Impacts of urbanization on regional nonpoint source pollution: case study for Beijing, China // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. No. 10. P. 9849–9860. doi: 10.1007/s11356-017-1153-1

7. Kumari M., Tripathi B.D. Source apportionment of wastewater pollutants using multivariate analyses // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2014. V. 93. P. 19–24. doi: 10.1007/s00128-014-1242-5

8. Biniak-Pierog M., Zielinska A., Zyromski A., Swider K. Precipitation structure as an indicator of reduction of water amount supplying soil profile // J. of Hydrology.

2020. V. 583. Article No. 124574. P. 1–45. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124574

9. Pershina N.A. Background component of precipitation // Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova. 2013. No. 569. P. 224–232 (in Russian).

10. Selegej T.S., Filonenko N.N., Shlychkov V.A., Lezhenin A.A., Lenkovskaya T.N. Formaldehyde pollution of the urban atmosphere as a function of certain meteorological factors // Optika atmosfery i okeana. 2013. No. 5. P. 422–426 (in Russian).

11. de Blas M., Ibanez P., Garcia J.A., Gómez M.C., Navazo M., Alonso L., Durana N., Iza J., Gangoiti G., de Camara E.S. Summertime high resolution variability of atmospheric formaldehyde and non-methane volatile organic compounds in a rural background area // Science of the Total Environment. 2019. V. 647. P. 862–877. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.411

12. Paramonov M., Gronholm T., Virkkula A. Below cloud scavenging of aerosol particles by snow at an urban site in Finland // Boreal Environment Research. 2011. V. 16. No. 4. P. 304–320.

13. Kurochkina V.A., Bogomolova T.G., Kirov B.L. Anthropogenic load on rivers of urban areas // Vestnik MGSU. 2016. No. 8. P. 100–109 (in Russian).

14. Recommendations for the calculation of systems of collection, removal and treatment of surface runoff from residential areas, sites of enterprises and determining the conditions for its release into water bodies. Moskva: NII VODGEO, 2014. 88 p. (in Russian).

15. Noskova T.V., Leites E.A., Labuzova O.M. The content of oil in samples of surface water and bottom sediments of the rivers Ob and Barnaulka // Voda: himiya i ehkologiya. 2018. No. 10–12 (117). P. 30–35 (in Russian).

16. Bezmaternykh D.M. Effect of anthropogenic pollution on macrozoobenthos structure in Barnaulka River (Upper Ob Basin) // Water Resources. 2018. V. 45. No. 1. P. 89–97. doi: 10.1134/S0097807818010062

17. Leytes E.A., Tylivanova J.A. Determination of indices of a chemical composition of water in Basin of Upper Ob and the River Aley // Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. No. 3–2 (79). P. 190–194 (in Russian).

18. Dolmatova L.A., Guseva M.A. Seasonal variability of organic matter in water and bottom sediments of Barnaulka river // Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta. 2005. No. 3 (38). P. 17–20 (in Russian).

19. The River Barnaulka: ecology, flora and fauna of the water-collecting area / Ed. M.M. Silant'eva. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy universitet, 2000. 224 p. (in Russian).

20. Dolmatova L.A., Egorova L.S., Mihajlenko M.A. Volatile phenols in the objects of Barnaulka river ecosystem // Izvestiya of Altay State University. 2004. No. 3. P. 10–14 (in Russian).

УДК 631.4

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-104-110

Динамика пожаров на Северо-Востоке европейской части России в голоцене

© 2021. Н. М. Горбач[1, 2], магистрант, старший лаборант-исследователь,
И. Н. Кутявин[2], к. с.-х. н., н. с., В. В. Старцев[2], м. н. с.,
А. А. Дымов[2], д. б. н., в. н. с., доцент,
[1]Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55,
[2]Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: nikolay.tbo@gmail.com

Представлена динамика пожаров в подзоне средней тайги на Северо-Востоке европейской части России в голоцене. В результате комплексных исследований реконструирована история пожаров, следы которых сохранились в торфяных почвах. Данные по пожарам были получены по результатам исследования содержания макроскопических частиц угля, радиоуглеродного датирования и дендрохронологического анализа. В ходе работ выявлено, что исследуемые среднетаёжные ландшафты Республики Коми (Мезенско-Вычегодская равнина, Северные Увалы, предгорье Северного Урала) имеют близкую историю палеопожаров. Результат частых палеопожаров наблюдается в нижних торфяных горизонтах, датируемых бореальным и атлантическим периодами голоцена в интервале от 10,2 до 4,5 тыс. календарных лет назад. Суббореальный период характеризуется существенно меньшим числом пожаров. Верхние горизонты торфа, датируемые концом субатлантического периода, содержат информацию об учащении пожаров в настоящее время. Показано, что в периоды оптимума голоцена в результате частых пожаров накопилось значительно больше стабильных форм углерода, чем в холодные периоды.

Ключевые слова: пожары, торфяные почвы, голоцен, бореальные леса, макрочастицы угля.

Dynamics of fires in the northeast of the European part of Russia in the Holocene

© 2021. N. M. Gorbach[1, 2] ORCID: 0000-0002-5099-6868, I. N. Kutyavin[2] ORCID: 0000-0002-7840-1934,
V. V. Startsev[2] ORCID: 0000-0002-6425-6502, A. A. Dymov[2] ORCID: 0000-0002-1284-082X,
[1]Pitirim Sorokin Syktyvkar state University,
55, Oktyabrsky Prospekt, Syktyvkar, Russia, 167001,
[2]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: nikolay.tbo@gmail.com

The dynamics of fires in the middle taiga subzone in the northeast of the European part of Russia in the Holocene are presented. Peat soils (Histosols) on the territory of the Komi Republic have been investigated. Dendrochronological studies and assessment of the content of macroscopic charcoal particles in peat were carried out at the sites. Radiocarbon dating values were obtained, which allowed us to build models of the rate of vertical growth of peat deposits and identify time intervals with frequent fires. In the course of the work, it was revealed that the studied middle taiga landscapes of the Komi Republic (Mezensko-Vychegodskaya Plain, Severnye Uvaly, foothills of the Northern Urals) have a similar history of paleofires. The paper shows that the maximum content of macroscopic charcoal particles is observed in the lower peat horizons dating from the Boreal and Atlantic periods of the Holocene (10,200 to 4,500 years ago). The Subboreal period is characterized by a significantly lower number of forest fires compared to the Atlantic and Sub-Atlantic periods. The upper peat horizons, dating from the end of the Sub-Atlantic period, contain information about the increase in the frequency of fires at present time. Regularity has been revealed according to which during the warm periods of the Holocene, stable forms of carbon as a result of frequent fires were accumulated significantly more than during the cold periods.

Keywords: paleofires, Histosols, Holocene, boreal forests, charcoal.

Пожары являются общепланетарным явлением и оказывают влияние на все компоненты экосистем, включая почвы. Они имеют глобальный характер и могут способствовать неожиданным изменениям в составе атмосферы, которые трудно спрогнозировать [1, 2]. Выбросы углекислого газа в результате учащения пожаров могут привести к эскалации глобального потепления. Наибольшее негативное влияние могут оказывать пожары в торфяных почвах в связи со значительными запасами углерода, аккумулированными в них [3, 4]. По современным оценкам запасы углерода в торфяных почвах России составляют 100,93 млрд т (на площади 3,691 млн км^2) [5], большая часть этих почв расположена в бореальной зоне. Торфяные почвы являются уникальными архивами, хранящими информацию о климатических и экологических изменениях, поэтому подходят для изучения истории прошедших пожаров [6–11]. Изучение истории пожаров возможно благодаря тому, что углистые частицы хорошо сохраняются в торфяных почвах в связи с замедленным вовлечением их в биологический круговорот из-за химических особенностей и неспособности деструкторов проникать в условиях дефицита кислорода [12–15].

Изучение истории пожаров в бореальной зоне в голоцене в значительной степени остаётся фрагментарным [3, 4, 7, 15], что затрудняет оценку динамики экосистем и возможную пирогенную активность при изменении климата [9, 16].

Цель данной работы заключалась в реконструкции динамики пожаров в подзоне средней тайги на Северо-Востоке европейской части России в голоцене на примере торфяных почв.

Для достижения данной цели перед нами стояли задачи: исследовать содержание макроскопических частиц (макрочастиц) угля по всей глубине торфяной залежи, провести радиоуглеродный анализ, выявить прошедшие пожары на исследуемых территориях.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в бореальной зоне Северо-Востока европейской части России, в подзоне средней тайги Республики Коми. Территория расположена в умеренном поясе. Современные среднегодовые температуры составляют 0–(-2) °С. Среднее количество осадков составляет 600–800 мм в год [17].

Объектами исследования были торфяные олиготрофные почвы. Торфяник I площадью 32 га расположен вблизи Максимовского стационара ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (61°41' с. ш., 50°40' в. д.) на территории Мезенско-Вычегодской равнины в Сысольском округе типичных подзолистых и торфяно-подзолисто-глееватых почв (рис. 1).

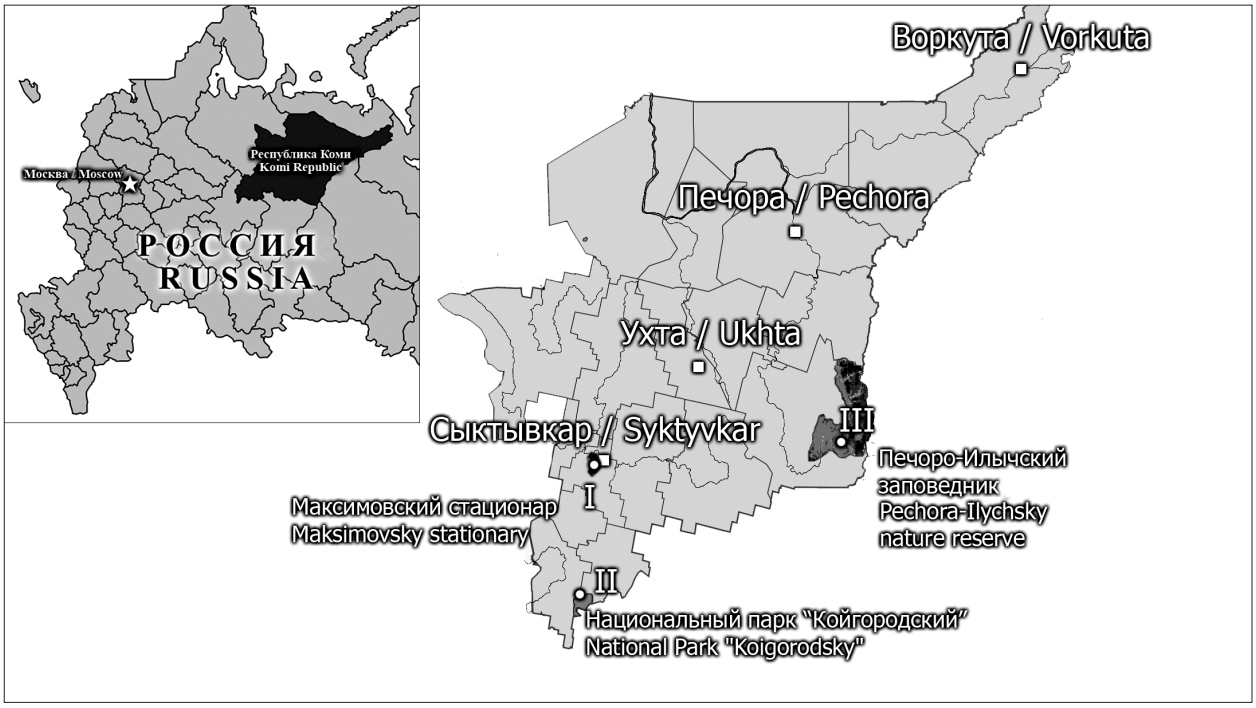


Рис. 1. Расположение объектов исследования / **Fig. 1.** The location of the research objects

Торфяник II площадью около 170 га расположен в окрестностях национального парка «Койгородский» (59°58' с. ш., 50°09' в. д.) на территории Северных Увалов в Летском округе дерново-подзолистых почв. Торфяник III площадью около 220 га расположен на территории Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника (61°57' с. ш., 57°55' в. д.) в предгорьях Северного Урала в Подгорно-Уральском округе глееподзолистых и горных лесных глееподзолистых иллювиально-гумусовых почв. Современная растительность исследуемых территорий представлена сосняками сфагновыми. Мохово-лишайниковый ярус характеризуется преобладанием сфагновых мхов: *Sphagnum angustifolium, S. fuscum, S. magellanicum*. Травяно-кустарничковый ярус отличается постоянным присутствием *Vaccinium uliginosum, V. myrtillus, Ledum palustre, Eriophorum vaginatum* и др.

Для анализа и реконструкции пирогенной истории был произведён подсчёт макрочастиц угля (пирогенные остатки более 125 мкм) [18]. Так как в акротелме и катотелме процесс торфообразования идёт по-разному [19], история современных пожаров установлена с применением дендрохронологических методов с использованием древесных кернов и спилов живой и мёртвой древесины, которые имеют пожарные подсушины [20]. Для выявления пожаров на территории Максимовского стационара было отобрано 30 кернов и 30 спилов, «Койгородского» национального парка – 60 кернов и 15 спилов, Печоро-Илычского заповедника – 300 кернов и 50 спилов. Образцы спилов с живых и мёртвых деревьев отбирались без валки дерева методом их выпиливания из ствола. Определение ширины годичных колец и датирование пожаров на подготовленных образцах древесины проведены с использованием программ CDendro 9.0.1 и CooRecorder 9.0.1, а также установки LINTAB и компьютерной программы TsapWin [21].

Радиоуглеродный анализ проводили жидкостно-сцинтилляционным методом в Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН (ИМКЭС СО РАН). Калибровка радиоуглеродного возраста в календарный возраст произведена с помощью программы CALIB REV – 7.10 [22]. На основе калиброванного возраста построена модель скорости вертикального прироста торфяной залежи при помощи программы Clam 2.3.9. [23].

Статистическую обработку полученных данных о концентрации макрочастиц угля в торфе осуществляли в программе CharAnalysis, адаптированной для среды программирования R [24]. Программа позволяет из полученных значений концентрации углистых частиц в торфяной колонке рассчитать скорость их аккумуляции, а также подобрать необходимые статистические параметры, позволяющие достоверно выделить фоновые значения скорости накопления частиц древесного угля и локальные пожарные события.

Результаты и обсуждение

Результаты дендрохронологических исследований представлены в таблице 1. Согласно полученным результатам, за предыдущие два-три столетия на рассматриваемых участках было зафиксировано близкое число пожаров (1–3). Показано, что последний раз торфяники подвергались пожарам в конце XVIII – начале XX веков (1772–1919 гг.), давность пожаров варьировала от 100 до 140 лет назад. На исследуемых участках интервал между пожарами составляет 37–45 лет с близкой средней периодичностью.

По результатам радиоуглеродного датирования выявлено, что формирование торфяника I мощностью 72 см началось в начале атлантического периода 8,2 тыс. календарных лет назад (кал. л. н.). Наибольшая скорость аккумуляции частиц угля в торфянике выявлена на глубине 16 см (более 10 частиц на см^2/год). Вероятно, это результат пожаров, пройденных более 100 лет назад (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1 / Table 1

Даты пожаров с периодами между ними на исследуемых объектах
Dates of fires and intervals between them at the investigated peat soils

Торфяник Peat soil	Установленные даты пожаров Dates when there were fires	Год учёта Year of the research	Интервал между пожарами, лет Interval between fires	Средняя периодичность пожаров, лет Average frequency of fires, years	Давность пожара, лет Last fire, year
I	1919; 1874	2019	45	45	100
II	1879	2019	–	–	140
III	1906; 1869; 1772	2019	37	37	113

Таблица 2 / Table 2

Результаты радиоуглеродного датирования торфов
Results of radiocarbon dating of peats

Лабораторный номер образца Laboratory number of samples	Глубина отбора образца, см Depth, cm	Возраст, ^{14}C лет назад Age, ^{14}C BP	Возраст, кал. л. н. (1σ) Age, cal. BP
Максимовский стационар (Maksimovsky stationary) (I)			
ИМКЭС 14С2106	25–35	990±90	1073 (978–1167)
ИМКЭС 14С2111	55–65	2730±115	2936 (2810–3063)
ИМКЭС 14С2139	89–90	7350±300	8207 (7914–8499)
«Койгородский» национальный парк (Koigorodsky National Park) (II)			
ИМКЭС 14С1976	50–70	4433±150	5147 (4938–5355)
ИМКЭС 14С1919	104–105	9030±200	10225 (9895–10556)
Печоро-Илычский заповедник (Pechora-Ilych nature reserve) (III)			
ИМКЭС 14С1903	30–40	455±80	510 (400–620)
ИМКЭС 14С1884	70–80	1875±55	1875 (1806–1943)
ИМКЭС 14С1882	100–110	3840±55	4339 (4223–4455)
ИМКЭС 14С1893	135–145	4725±150	5378 (5043–5713)
ИМКЭС 14С1895	160–170	6228±120	7194 (7051–7337)
ИМКЭС 14С1969	210–220	6730±120	7653 (7556–7750)

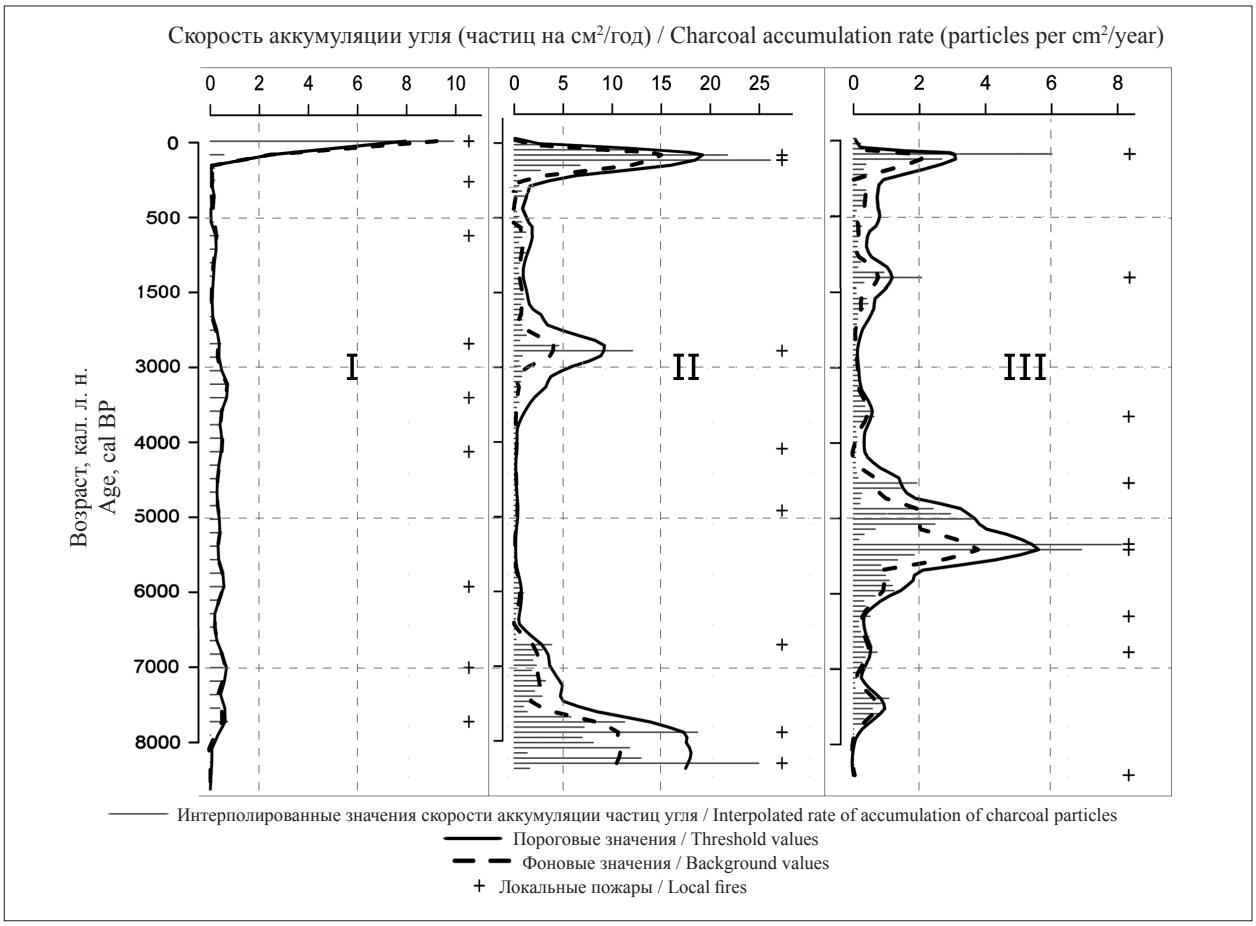


Рис. 2. Содержание макроскопических частиц угля в исследуемых торфяных почвах: I – в окрестностях Максимовского стационара; II – в окрестностях национального парка «Койгородский»; III – в Печоро-Илычском заповеднике / **Fig. 2.** The content of macroscopic charcoal particles in the investigated peatlands: I – in the surroundings of the Maksimovski stationary; II – in the surroundings of the Koigorodsky National Park; III – in the Pechora-Ilych nature reserve

Торфяник в окрестностях стационара выделяется высоким содержанием макроскопических частиц (1084 шт./см^3) в современный период (±500 кал. л. н.). Вероятно, на это повлияло близкое расположение к крупному населенному пункту (рис. 1).

Формирование торфяника II мощностью 105 см началось в первой половине бореального периода 10,2 тыс. кал. л. н. Пирогенные углистые включения обнаружены в самом нижнем горизонте (193 шт./см^3), что свидетельствует о пожаре (или серии пожаров), который, вероятно, способствовал заболачиванию территории. В период от 10,2 до 6,5 тыс. кал. л. н. наблюдается высокая частота пожаров. Согласно данным дендрохронологических исследований 140 лет назад был крупный пожар (табл. 1), способствовавший формированию пирогенного горизонта на глубине 10–15 см.

Формирование торфяника III мощностью 218 см началось 7,7 тыс. кал. л. н. и относится к середине атлантического периода. По данным подсчёта макрочастиц угля максимальное количество пирогенных включений в торфяной толще обнаружено на глубине 120–140 см (496 шт./см^3), что соответствует 5,5 тыс. кал. л. н. (рис. 2). По результатам дендрохронологии, торфяник был подвержен пожару в 1906 г. (113 лет назад), что привело к увеличению количества угля на глубине 18–20 см (139 шт./см^3) (табл. 1). Между исследуемыми торфяными почвами выявлены различия в содержании макрочастиц угля. Торфяник в национальном парке «Койгородский» отличается более высокой концентрацией древесного угля в целом. Это может указывать на более высокую частоту пожаров в лесах, окружающих этот участок, вероятно, из-за геоморфологических, гидрологических особенностей и более южного расположения.

Показано, что наиболее длительный промежуток времени с высокой скоростью аккумуляции угля приходился на конец бореального и на атлантический периоды голоцена. Эти данные соответствуют ранним исследованиям климата на территории северо-востока Европы. Согласно [25, 26] в атлантический период среднегодовая температура и влажность превышали современные показатели, и в этот период наблюдались этапы резких, не отразившихся повсеместно, климатических изменений. Данные результаты совпадают с [27, 28], но в них также выявлено, что летние значения солнечной радиации в бореальной зоне в раннем голоцене (11–8 тыс. кал. л. н.) становились выше и достигали пиковых значений в среднем голоцене 8–4,5 тыс. кал. л. н. (атлантический период) и уменьшались в позднем голоцене вплоть до настоящего времени. Вероятно, в период раннего голоцена преобладали растительные сообщества, устойчивые к пожару (широколиственные леса), которые сменились пожароопасными фитоценозами, состоящими в основном из вересковых, сосновых, берёзовых и ивовых сообществ, способствовавших распространению пожаров в период среднего голоцена [29].

Учитывая, что в атлантическом периоде (климатический оптимум голоцена) среднеиюльская температура была выше, резкие возрастания летних температур с засушливыми периодами могли способствовать учащению пожаров на исследуемой территории. Таким образом, можно предположить, что при повышении летней температуры воздуха, уменьшении влажности и смене растительных сообществ на пожароопасные следует ожидать увеличения количества пожаров в средней тайге европейской части России. За период суббореального и начала субатлантического периодов с более холодным, влажным климатом [25] и с преобладанием пожаростойких растительных сообществ, характерных для конца голоцена [29], выявлена меньшая скорость аккумуляции пирогенных остатков.

Отмечен резкий рост скорости аккумуляции угля в конце голоцена. Предположительно, это может быть связано с возрастающим антропогенным влиянием. Близкие результаты были представлены в [7], где авторы связывают увеличение скорости аккумуляции угля с деятельностью человека.

Заключение

Впервые представлены результаты по комплексному изучению пожаров на территории бореальной зоны Северо-Востока европейской части России в голоцене. Воссоздана динамика пожаров и накопления углистых частиц в торфяных горизонтах. Выявленные пирогенные признаки изученных торфов отражают современное развитие болот и их отдельные этапы.

Установлена высокая интенсивность пожаров в атлантический период голоцена, в котором показатели температуры превышали современные. Суббореальный период характеризуется меньшей частотой пожаров.

Выявлено резкое увеличение концентрации макрочастиц угля в нижних горизонтах

исследуемых торфяных почв. Можно предположить, что пожары в них являлись фактором, приведшим к первоначальному заболачиванию территорий.

Показано возрастание скорости аккумуляции макроскопических частиц угля в настоящее время, что, вероятно, связано с ростом антропогенного влияния.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-29-05111 мк.

References

1. Doerr S.H., Santın C. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world // Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences. 2016. V. 371. P. 1–10. doi: 10.1098/rstb.2015.0345

2. Flannigan M.D., Krawchuk M.A., de Groot W.J., Wotton B.M., Gowman L.M. Implications of changing climate for global wildland fire // International journal of wildland fire. 2009. V. 18. No. 5. P. 483–507. doi: 10.1071/WF08187

3. Gabbasova I.M., Suleimanov R.R., Sitdikov R.N., Garipov T.T. Pyrogenic degradation of drained peat soils // Eurasian Soil Science. 2005. V. 6. P. 642–647 (in Russian).

4. Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Joosten H. Multispectral satellite based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow Region (Russia) // Ecological Engineering. 2020. Article No. 106044. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.106044

5. Vompersky S.E., Tsyganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. Bog formation of the Russian area as a factor of fixing atmospheric carbon, carbon turnover on the area of Russia // Selected scientific proceedings on the problem "Global evolution of the biosphere. Anthropogenic contribution". Moskva: Ministry of Science of the Russian Federation, 1999. P. 124–145 (in Russian).

6. Efremova T.T., Efremov S.P. Pyrogenic transformation of organic matter in soils of forest bogs // Eurasian Soil Science. 2006. V. 39. No. 12. P. 1297–1305. doi: 10.1134/S1064229306120039

7. Kupriyanov D.A., Novenko E.Y. Reconstruction of the Holocene dynamics of forest fires in the central part of Mesherskaya lowlands according to antracological analysis // Contemporary Problems of Ecology. 2019. V. 12. No. 3. P. 204–212. doi: 10.1134/S1995425519030065

8. Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Volkova E.M., Tsyganov A.N. Holocene dynamics of vegetation and ecological conditions in the center of the East European plain // Russian Journal of Ecology. 2018. V. 49. No. 3. P. 218–225. doi: 10.1134/S1067413618030062

9. Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M.P., Brossier B., Alleaume S., Ali A.A. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia) // The Holocene. 2019. V. 29. P. 1906–1920. doi: 10.1177/09596 83619865593

10. Dyakonov K.N., Novenko E.Y., Mironenko I.V., Kuprijanov D.A., Bobrovsky M.V. The role of fires in the Holocene landscape dynamics of the southeastern part of Meshchera lowlands // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 477. No. 1. P. 1336–1342. doi: 10.1134/S1028334X17110125

11. Egli M., Mastrolonardo G., Seiler R., Raimondi S., Favilli F., Crimi V., Krebs R., Cherubin P., Certini G. Charcoal and stable soil organic matter as indicators of fire frequency, climate and past vegetation in volcanic soils of Mt. Etna, Sicily // Catena. 2012. V. 88. P. 14–26. doi: 10.1016/j.catena.2011.08.006

12. Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle // Contemporary Problems of Ecology. 2008. V. 1. No. 2. P. 168–182. doi: 10.1134/S1995425508020021

13. Jones M.W., Santín C., van der Werf G.R., Doerr S.H., Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon // Nat. Geosci. 2019. V. 12. P. 742–747. doi: 10.1038/s41561-019-0403-x

14. Loisel J., Gallego-Sala A.V., Amesbury M.J., Magnan G., Anshari G., Beilman D.W., Wu J. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink // Nat. Clim. Chang. 2021. V. 11. No. 1. P. 70–77. doi: 10.1038/s41558-020-00944-0

15. Preston C.M., Schmidt M.W.I. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions // Biogeosciences. 2006. V. 3. No. 4. P. 397–420. doi: 10.5194/bg-3-397-2006

16. Karpenko L.V., Prokushkin A.S. Reconstruction of fires in virgin forests at Sym-Dubches interfluve in the Holocene // Siberian Journal of Forest Science. 2019. V. 5. P. 61–69 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20190508

17. Taskaev A.I. Atlas of the Republic of Komi on climate and hydrology. Moskva: Drofa; DiK, 1997. 115 p. (in Russian).

18. Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments // Mires and Peat. 2011. V. 7. P. 1–18.

19. Inisheva L.I. Peat soils: genesis and classification // Eurasian Soil Science. 2006. V. 39. No. 7. P. 781–786. doi: 10.1134/S1064229306070027

20. Madany M.N., Swetnam T.W., West N.E. Comparison of two approaches for determining fire dates from tree scars // Forest Science. 1982. V. 28. No. 4. P. 856–861.

21. Rinn F. TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation. Heidelberg, 1996. 264 p.

22. Stuiver M., Reimer P.J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program // Ra-

diocarbon. 1993. V. 35. No. 1. P. 215–230. doi: 10.1017/S0033822200013904

23. Blaauw M. Methods and code for 'classical'age-modelling of radiocarbon sequences // Quaternary geochronology. 2010. V. 5. No. 5. P. 512–518. doi: 10.1016/j.quageo.2010.01.002

24. Higuera P. Char Analysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Bozeman: MT, Montana State University, 2009. 27 p.

25. Borisova O.K. Landscape and climate change in holocene // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2014. No. 2. P. 5–20 (in Russian).

26. Golubeva Yu.V. Holocene climate and vegetation of Komi Republic // Lithosphere. 2008. No. 2. P. 124–132 (in Russian).

27. Heikkilä M., Seppä H. A 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland // Quaternary Science Reviews. 2003. V. 22. No. 5–7. P. 541–554. doi: 10.1016/S0277-3791(02)00189-0

28. Feurdean A., Vannière B., Finsinger W. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe // Biogeosciences. 2020. V. 17. P. 1213–1230. doi: 10.5194/bg-17-1213-2020

29. Molinari C., Carcaillet C., Bradshaw R.H., Hannon G.E., Lehsten V. Fire-vegetation interactions during the last 11,000 years in boreal and cold temperate forests of Fennoscandia // Quaternary Science Reviews. 2020. V. 241. Article No. 106408. doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106408

Уважаемые коллеги!
Приглашаем Вас принять участие в работе
III Всероссийского научного форума
«Утилизация и рециклинг отходов производства и потребления»

г. Киров, 23–25 ноября 2021 г.

В рамках форума будут проходить:

1. III Всероссийская научно-практическая конференция «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии».
2. XIX Всероссийская конференция с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем».
3. Молодёжный конкурс научно-исследовательских проектов «Разработка методов и технологий обращения с отходами производства и потребления, организации экологического мониторинга».

На форуме будут представлены результаты исследований, проведённых в ходе Менделеевской экологической экспедиции на Байкал (2021 г.).

К началу работы конференции планируется издать сборник материалов конференции.

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

УДК 574.22 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117

Оценка биоразнообразия как механизм изменения статуса особо охраняемых природных территорий

© 2021. В. М. Рябов[1], ст. преподаватель, Е. В. Рябова[1], к. б. н., зав. кафедрой,
Т. Я. Ашихмина[1, 2], д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
[1]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
[2]Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Росссия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ryapitschi@yandex.ru

Исследования по оценке биоразнообразия и состояния экосистем памятника природы регионального значения «Ульское болото» проводили в июне и июле 2019 г.

По результатам исследования дана краткая характеристика компонентов ландшафтов, климата, почвенного покрова, гидрологической сети памятника природы регионального значения «Ульское болото». Приведены сведения о флоре и растительности, лесном фонде, фауне и животном мире. Определены места нахождения и состояние популяций редких и находящихся под угрозой уничтожения объектов животного и растительного мира. Представлены сведения о суммарном биологическом разнообразии. Охарактеризованы основные экосистемы междуречья рр. Ула и Ильина. Выявлена природоохранная ценность сообществ и компонентов биологического разнообразия памятника природы «Ульское болото» поддерживающая стабильность прилегающих территорий.

Материалы исследования послужили обоснованием для расширения границ особо охраняемой природной территории. Обоснованы предпосылки для придания природному комплексу статуса государственного природного заказника регионального значения.

Ключевые слова: биоразнообразие, растительность, позвоночные животные, особо охраняемая природная территория.

Assessment of biodiversity as a mechanism for changing the status of specially protected natural areas

© 2021. V. M. Ryabov[1] ORCID: 0000-0003-3162-7423,
E. V. Ryabova[1] ORCID: 0000-0002-0125-5772,
T. Ya. Ashikhmina[1, 2] ORCID: 0000-0003-4919-0047,
[1]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[2]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: ryapitschi@yandex.ru

Studies to assess the biodiversity and the state of ecosystems of the natural monument of the regional significance "Ulsky swamp" were carried out in June and July 2019.

Based on the results of the study, a brief description of the components of landscapes, climate, soil cover, hydrological network of the natural monument of regional significance "Ulsky swamp" is given. It is shown the information about flora and vegetation, forest fund, fauna and animal world. The places of discovery and the state of populations of rare and endangered objects of flora and fauna are indicated. Information on the total biological diversity is presented. The main ecosystems and objects of particular value for the region in the interfluve of the rivers Ula and Ilyina are characterized.

The conservation value of natural communities and components of biological diversity, which maintains the stability of the adjacent territories, has been revealed. Based on the research materials, the boundaries of a specially protected natural area were offered to expand and the prerequisites for giving the natural complex the status of a state nature reserve of regional significance were substantiated.

Keywords: biodiversity, vegetation, vertebrates, specially protected natural area.

В настоящее время в мире остро стоит проблема сохранения биологического разнообразия. Важную роль в сохранении и поддержании биологического разнообразия играют ООПТ [1]. Для этого создаются вновь или расширяются современные границы особо охраняемые природные территрии (ООПТ). К числу таковых охраняемых природных территорий, «требующих» расширения границ, относится памятник природы регионального значения «Ульское болото». При общей площади 7412 га, из них только 3024,9 га имеет охранный статус [2]. В связи с чем исследование по оценке биоразнообразия, в целях научного обоснования расширения границ региональной ООПТ, является актуальным.

Целью работы является комплексная оценка биоразнообразия для разработки научного обоснования расширения территории памятника природы регионального значения «Ульское болото».

Материалы и методы исследования

Изучение биоразнообразия памятника природы регионального значения «Ульское болото» и прилегающих к нему территорий в пределах Опаринского, Подосиновского, Лузского районов Кировской области выполняли в летний период 2019 г. Были проведены флористические, геоботанические, фаунистические и экологические исследования. С целью получения характеристики местообитаний сделаны полные геоботанические описания фитоценозов на пробных площадях по общепринятым методикам [3]. Предварительно нами проанализированы опубликованные научные данные по этой территории [4–6]. Названия таксонов представлены в соответствии с наиболее употребляемой в настоящее время биологической номенклатурой [7–10]. Редкие и охраняемые виды указаны в соответствии с Красной книгой Российской Федерации [5] и Красной книгой Кировской области [11].

Обследуемая территория, расположенная на северо-западе Кировской области у границы с Республикой Коми включает в себя Ульское и Худышевское (Худышинское) болота и примыкающие к ним лесные массивы. Суммарная обследованная площадь составляет 30405 га.

Исследуемая территория находится на водоразделе бассейна рр. Волги и Северной Двины в северной части Восточно-Европейской равнины (максимальная высота 178 м над у. м., минимальная – 140 м над у. м.). Четвертичные отложения представлены моренными отложениями, состоящими из валунных суглинков, песка и гравия [12]. Почвенный покров исследованной территории представлен четырьмя типами почв: дерново-подзолистые преимущественно неглубокоподзолистые, подзолы иллювиально-железистые, торфяные болотные верховые и торфяно- и торфянисто-подзолисто-глееватые [13].

Климат умеренно континентальный. Среднегодовая температура составляет +1,5 °С. Наименьшая средняя продолжительность безморозного периода составляет 102 дня. В среднем многолетняя годовая сумма осадков составляет 612 мм [14].

Гидрологическая сеть территории представляет собой болотно-речную систему, относящуюся к Северодвинскому бассейну и состоящую из Ульского и Худышевского болот и рр. Ула и Ильина.

Болото Ульское. Общая площадь – 7412 га. Северная и северо-восточная часть болота представлена грядо-мочажинным комплексом с открытыми безлесными участками («гладь»). Имеется около десятка «окон» округлой формы, диаметром до 4 м и глубиной 3–4,5 м. Южная и центральная часть болота в большей степени представлена грядо-озерковым комплексом. Большинство «озёр» вытянуто с северо-запада на юго-восток. Наибольшая длина отдельных озёр составляет 180–195 м, при ширине 23–30 м. Глубины варьируют от 0,4 до 4,5 м. Дно всех озёр торфянистое. Общее проективное покрытие водной поверхности болота составляет не более 5%. Переувлажнённая часть болота составляет около 15% от общей площади.

Худышевское (Худышинское) болото. Общая площадь – 1472 га. Большая часть болота представлена грядо-мочажинным комплексом. Прибрежная и северо-восточная часть покрыта «рямом» – разреженными насаждениями *Pinus sylvestris* L. болотной формы. Переувлажнённая часть болота составляет около 10% от общей площади.

Река Ула берёт начало у юго-западного берега Ульского болота (урочище «Водопады»). Общая длина реки составляет 74 км. Является левобережным притоком р. Луза. Ширина реки до 15 м, скорость течения – 0,3 м/с. В пределах исследуемой территории расположено 20 км речного русла, представляющего собой цепочку омутов либо слабопроточных озёр, соединённых одним или несколькими водотоками. Берега низкие, отсутствует прирусловый вал. Дно торфянистое, реже песчано-торфянистое.

Река Ильина берет начало в северной части Худышевского болота. Общая длина реки (до слияния с р. Ула) составляет 12,5 км. В пределах Худышевского болота она представляет собой медленно текущий водоток с омутами до 3,5 м глубиной и шириной до 2–2,5 м. Берега низкие, отсутствует прирусловый вал. Дно торфянистое. Общая площадь всех водно-болотных угодий составляет более 9000 га, (около 30% от обследуемой территории).

В соответствии с ботанико-географическим делением территория обследования входит в состав Уральско-Западносибирской провинции Евразиатской таёжной области на положении Камско-Печорско-Западносибирской подпровинции, в подзоне средней тайги [15].

Результаты и обсуждение

Исследуемая территория характеризуется достаточно высокой концентрацией биологического разнообразия. В результате полевых изысканий было выявлено произрастание 229 видов сосудистых растений из 64 семейств, 5 отделов и 5 классов, отмечено обитание 186 видов позвоночных животных.

Флора и растительность. Среди сосудистых растений господствующими семействами являются Poaceae (17 видов) и Rosaceae (16 видов). Семейство Ranunculaceae представлено 13 видами, Asteraceae и Ciperaceae – по 11 видов. Семейство Salicaceae образовано 10 видами, Cariophillaceae и Aplaceae – 9 видами каждое. Замыкают перечень преобладающих семейств и включают по 8 видов растений каждое семейства – Orchidaceae, Ericaceae и Fabaceae.

На исследуемом участке практически нет сорных видов, что свидетельствует о высокой эталонной значимости изученных экосистем.

Растительность района исследований представлена следующими типами растительных сообществ: болота (40% от общей площади), леса (около 60%), луга (менее 1%), водные сообщества (менее 1%).

Ульское и Худышевское болота находятся в неизменном виде, так как на них никогда не проводились мелиоративные работы. В пределах болотных контуров нами выделено пять основных типов фитоценозов.

1. Вершинные сосново-сфагновые комплексы. Занимают хорошо дренированные участки вдоль р. Ула. В этих условиях формируется сплошной покров из *Sphagnum* sp. с *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L., *Andromeda polifolia* L., *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench. На таких участках характерна высокая продуктивность древостоя сосны. Настоящих мочажин нет, изредка встречаются их зачатки в виде небольших понижений.

2. Сосново-пушицево-сфагновые комплексы. Имеют незначительное распространение, связанное с дренированными участками маломощной залежи, глубиной до 2–3 м. Как правило, образуются при отмирании соснового леса в результате возрастания увлажнения.

3. Сфагновые переходные топи. Встречаются узкими безлесными полосами вдоль минерального побережья болот и островов, или участками с исключительно ровной поверхностью, занимающими большие пространства.

4. Грядово-мочажинный комплекс. Занимает наибольшую площадь из всех комплексов Худышевского и северную часть Ульского болот. Основная особенность этого фитоценоза – параллельное расположение гряд и мочажин, вытянутых в направлении, перпендикулярном уклону. Гряды имеют высоту до 0,5 м, ширину 1–8 м и длину до 120 м. На них произрастает *Eriophorum vaginatum* L. и *Pinus sylvestris* L. различных форм, иногда замещённые *Betula nana* L. В значительном количестве встречаются также *Rubus chamaemorus* L., *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench. Гряды занимают 40–60% от общей площади комплекса. В растительном покрове мочажин доминируют *Eriophorum vaginatum* L., *Scheuchzeria palustris* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Carex* sp., *Drosera* sp.. В некоторых мочажинах встречаются пятна голого торфа (остатки деградированных гряд).

5. Озерковый грядово-мочажинный комплекс. Расположен на участках с ослабленным стоком в южной части Ульского болота. Гряды занимают 25–30% от общей площади комплекса. На грядах преобладают *Sphagnum* sp., в значительном количестве встречаются *Eriophorum vaginatum* L., *Andromeda polifolia* L., реже болотная форма *Pinus sylvestris* L., высотой обычно менее 1 м.

На территории исследования были выявлены следующие типы лесов.

Сосняки. Типичны для олиготрофных и мезотрофных болот. Существование коренных сосняков, достигающих возраста более 150 лет на эвтрофных болотах, предположительно, объясняется периодическими пожарами, что задерживает смену пород. Наиболее распространёнными типами сосняков являются: долгомошный, кустарниково-сфагновый, пушицево-сфагновый – для олиготрофных болот; осоково-сфагновый – для мезотроф-

ных болот; осоково-тростниковый, болотно-травяной, сфагново-травяной – для эвтрофных болот. В междуречье рр. Ула и Ильина были выявлены старовозрастные сосняки-зелёномошники с преобладанием *Polytrichum commune* L. и *Vaccinium myrtillus* L., а также сосняк можжевеловый тростниково-багульниковый.

Ельники. На эвтрофных болотах они образуют кореные типы леса – ельник зелёномошно-травяной, болотно-травяной, сфагново-травяной. На мезотрофных болотах еловые леса менее распространены. Наиболее распространёнными типами являются ельник долгомошный, сфагновый, осоково-сфагновый, кустарниково-сфагновый.

В междуречье рр.Ула и Ильина господствующим типом растительности является вторичный, неясного происхождения берёзово-еловый лес. Изредка в состав древостоя (чаще в подросте) входят *Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Betula pubescens* Ehrh. и *Populus tremula* L. В травяно-кустарничковом ярусе наряду с такими растениями, как *Vaccinium myrtillus* L., *Majanthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Oxalis acetosella* L., преобладает *Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soo и *Platanthera bifolia* (L.) Rich.

Березняки на болотных почвах, как правило, являются вторичными. Коренными насаждениями на мезотрофных и эвтрофных болотах являются березняк кочкарно-осоковый, болотно-травяной, долгомошный, осоково-сфагновый. Ёрники, образованные *Betula nana* L. и *B. humilis* Schrank, с примесью *Salix* sp. и *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar встречаются на хорошо дренированных участках болот с кочкарным микрорельефом.

Луга встречаются узкой полосой в поймах рр. Ула и Ильина. На гривах отмечены пустошные луга с низким травостоем, состоящим из *Poa pratensis* L., *Potentilla* sp., *Pimpinella saxifrage* L. и др. Настоящие луга представлены мелкотравными на слабоувлажнённых почвах и крупнозлаковыми, находящимися в понижениях. Мелкотравные луга имеют невысокий травостой из *Festuca pratensis* Huds., *Poa pratensis* L., *Phleum pretense* L. Содоминантами являются *Achillea millefolium* L., *Ranunculus acris* L., *Equisetum pretense* Ehrh. и *E. arvense* L. В растительности крупнозлаковых лугов преобладают *Festuca pratensis* Huds., *Agrostis* sp., *Alopecurus pratensis* L., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub., с разнотравьем из *Achillea millefolium* L., *Geranium pratense* L., *Ranunculus acris* L., *Trifolium* sp., *Lathyrus pratensis* L., *Vicia cracca* L.

Сообщества водных растений формируются в зависимости от глубины водоёма. В прибрежной зоне произрастают *Alisma plantago-aguatica* L.,*Carex* sp., *Equisetum fluviatile* L., *Ranunculus repens* L., *Scirpus sylvaticus* L. Плавающие растения представлены *Lemna minor* L. и *L. trisulca* L. На более глубоких участках водоёма (0,5–2 м) отмечены *Scirpus lacustris* L., *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Potamogeton lucens* L.

Позвоночные животные исследуемой территории

На территории исследования отмечено пребывание 186 видов позвоночных животных.

Ихтиофауна. По результатам облова и опросным данным в верхнем течении р. Ула и устьевом участке р. Ильина встречаются представители всех половозрастных групп трёх видов рыб: *Rutilus rutilus* L., *Esox lucius* L., *Perca fluviatilis* L. У речного окуня в омутах верхнего течения р. Ула обнаружены морфы с нехарактерной тёмной (чёрной) окраской.

Земноводные. Отмечено пребывание 5 видов земноводных: *Triturus vulgaris* L., *Salamandrella keyserlingii* Dybowski, *Bufo bufo* L., *Rana arvalis* Nilsson, *Rana temporaria* L.

Пресмыкающиеся. На исследуемой территории обитает всего лишь один обычный фоновый вид *Lacerta vivipara* Jacguin.

Птицы. Состав орнитофауны исследуемого участка включает в себя 143 вида. Из них для 126 видов отмечено гнездование [6]. Для 91 вида подтверждено пребывание на данной территории в гнездовой период 2019 г. [16]. Статус пролётных имеют 15 видов. Два вида птиц, по опросным данным, отмечены только в зимнее время: *Acanthis flammea* L., *Nyctea scandiaca* L.

Для оценки численности индикаторных видов птиц в экосистемах верховых болот [1] нами был проведён учёт относительной численности и расчёт относительной плотности [17] гнездящихся птиц в северной части Ульского болота (табл. 1). Экстраполируя полученные данные на потенциально возможные гнездовые стации на Ульском болоте, мы прогнозируем здесь общую гнездовую численность указанных видов в следующих размерах: *Larus canus* L. – 80 пар, *Limosa limosa* L. – 60 пар, *Numenius arquata* L. – 35–40 пар, *Numenius phaeopus* L. – 25–30 пар, *Motacilla flava* L. до 100 пар.

Млекопитающие. Териофауна представлена 34 видами. Наиболее представленны-

Таблица 1 / Table 1

Относительная численность и относительная плотность некоторых видов птиц на Ульском болоте
The relative abundance and relative density of some bird species in the Ulsky bog

№ No.	Вид / Species	Относительная численность (особь/км) / Relative abundance (individual/km)	Относительная плотность (особь/га) / Relative density (individual/ha)
1	*Larus canus* L.	30,5	1,52
2	*Limosa limosa* L.	4	0,2
3	*Numenius phaeopus* L.	6	0,3
4	*Numenius arquata* L.	4	0,2
5	*Vanellus vanellus* L.	1	0,05
6	*Sterna hirundo* L.	1,5	0,075
7	*Tringa nebularia* Gunnerus	0,5	0,025
8	*Motacilla flava* L.	4	0,2
9	*Anas crecca* L.	1	0,05
10	*Anas acuta* L.	2	0,1

Таблица 2 / Table 2

Виды растений и животных, включённые в Красную книгу Кировской области и Красную книгу Российской Федерации / Plant and animal species included in the Red Book of the Kirov region and the Russian Federation Red Book

№ No.	Вид / Species	Красная книга Кировской области Red Data Book of the Kirov region	Красная книга Российской Федерации Red Data Book of the Russian Federation
1	*Salamandrella keyserlingii* Dybowski	+	
2	*Mustela lutreola* L.	+	
3	*Tamias sibiricu* Laxmann	Приложение № 2 Appendix No. 2	
4	*Circus aeruginosus* L.	+	
5	*Aquila chrysaetos* Linnaeus	+	+
6	*Haliaeetus albicilla* L.	+	+
7	*Pluvialis apricaria apricaria* L.	+	+
8	*Lagopus lagopus rossicus* Serebrovsky	+	+
9	*Lanius excubitor* L.	+	+
10	*Cypripedium calceolus* L.	+	+
11	*Hammarbya paludosa* (L.) Kuntze.	+	
12	*Epipactis palustris* (L.) Crantz	+	
13	*Dactylorhiza maculata* (L.) Soo	+	
14	*Dactylorhiza traunsteineri* (Saut.) Soo	+	+
15	*Juncus stygius* L.	+	
16	*Baeothryon alpinum* (L.) Egor	+	
17	*Baeothryon caespitosum* (L.) A. Dietr	+	
18	*Atragene sibirica* L.	Приложение № 2 Appendix No. 2	
19	*Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soo		
20	*Platanther abifolia* (L.) Rich		
21	*Duscheki afruticosa* (Rupr.) Pouzar		
22	*Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm	+	+
23	*Neckera pennata* Hedw	+	

ми являются отряды *Rodentia* (12 видов) и *Carnifora* (14 видов). Основная масса зверей являются обычными видами для данной природно-климатической зоны. Однако отсутствует достоверная информация об обитании *Mustela lutreola* L. Вид был включён в фаунистический список на основании анализа опросных данных.

Таким образом, фауна позвоночных животных исследуемой территории представлена преимущественно типичными для южной тайги видами. В процентном соотношении от общего видового состава отдельных классов позвоночных животных, обитающих на территории Кировской области [18] наиболее представлены млекопитающие – 63%. Соответственно, птицы – 49%, земноводные – 50%, пресмыкающиеся – 14%, костные рыбы – 6%. Потенциально, на этой территории могут обитать еще до 4–5 видов млекопитающих, 40–50 видов птиц, 1–2 вида пресмыкающихся.

Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения объекты животного и растительного мира. На исследуемой территории выявлено обитание 8 видов позвоночных животных, 8 видов сосудистых растений, 1 вид лишайника, 1 вид мха, включённых в Красную книгу Кировской области [5]. Из них 5 видов позвоночных животных, 2 вида сосудистых растений, 1 вид лишайника внесены в Красную книгу Российской Федерации [11] (табл. 2), а 1 вид позвоночных животных и 4 вида сосудистых растений внесены в Приложение № 2 Красной книги Кировской области [5].

Заключение

Действующий в настоящее время у данной ООПТ статус «Памятник природы регионального значения» с площадью 3024,9 га не позволяет в полной мере устранить или снизить существующие и потенциально возможные негативные антропогенные воздействия как на экосистемы в целом, так и на отдельные виды, сообщества, экологические группы, в частности.

Решение данной проблемы возможно за счёт объединения площади памятника природы «Ульское болото» и прилегающих к нему таёжно-болотных комплексов (площадью 27381 га) в одну ООПТ с приданием ей статуса «Государственный природный заказник регионального значения» общей площадью 30405 га.

Основанием для изменения охранного статуса является и то, что Ульское болото – одно из крупнейших по площади верховых болот области. Часть его территории уже значительное время имеет охранный статус: является памятником природы регионального значения, а общедоступные охотничьи угодья в пределах Опаринского района являются участком с запретом охоты. Кроме того, весь район исследования входит в состав ключевой орнитологической территории России международного значения (КОТР) «КИ – 006 Ульское болото» с общей площадью 46430 га [19]. Ульское и Худышевское болота являются местами концентрации водных и околоводных птиц во время сезонных миграций, а также местом гнездования околоводных птиц с высокой плотностью гнездовых пар. Болотные массивы и старовозрастные сосновые леса не подвергались антропогенному воздействию. Здесь отмечено обитание и произрастание 18 видов животных и растений, внесённых в Красную книгу Кировской области (из них 8 видов занесены в Красную книгу Российской Федерации [11]), и 5 видов из Приложения № 2 к Красной книге Кировской области [5].

Расширение территории и смена статуса с «памятника природы» на «природный заказник» будут способствовать созданию и обеспечению условий для сохранения болотных массивов, сохранения и восстановления лесных экосистем, поддержания биологического разнообразия, сохранения и воспроизводства редких, охраняемых и хозяйственно значимых объектов животного и растительного мира.

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

References

1. Ryabov V.M., Ashikhmina T.Ya. Faunistic characteristics and monitoring of vertebrates on the territory of the State Nature Reserve “Bylina” // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No 1. P. 79–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-079-084

2. Order of the Government of the Kirov region No. 109 of 04/26/2013 “On approval of the Concept for the development of specially protected natural areas of the Kirov region for the period until 2020 and the Prospective scheme for the development of specially protected natural areas of regional significance in the Kirov region” [Internet resource] http://docs.cntd.ru/document/973039243 (Accessed: 22.05.2021) (in Russian).

3. Ipatov V.S. Description of phytocenosis: Methodical recommendations. Sankt-Peterburg: Izd-vo SpbGU, 1998. 93 p. (in Russian).

4. Tarasova E.M. Flora of the Vyatka Territory. Part 1. Vascular plants. Kirov: OAO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2007. 440 p. (in Russian).

5. Red Book of the Kirov region: animals, plants, mushrooms / Eds. O.G. Baranova, E.P. Lachokha, V.M. Ryabov, V.N. Sotnikov, E.M. Tarasova, L.G. Tselishcheva. Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2014. 336 p. (in Russian).

6. Sotnikov V.N., Ryabov V.M. Square 39VUG3 Kirov region, Komi Republic // Fauna i naselenie ptits Evropeyskoy Rossii. Ezhegodnik Programmy "Ptitsy Moskvy i Podmoskovya". 2017. V. 8. P. 570–572 (in Russian).

7. Kuzmin S.L., Semenov D.V. Synopsis of the fauna of amphibians and reptiles of Russia. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2006. 139 p. (in Russian).

8. Koblik E.A., Redkin Ya.A., Arkhipov V.Yu. List of birds of the Russian Federation. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2006. 256 p. (in Russian).

9. Pavlinov I.Ya., Kruskop S.V., Varshavskiy A.A., Borisenoko A.V. Land animals of Russia. Reference guide. Moskva: Izd-vo KMK, 2002. 298 p. (in Russian).

10. Cherepanov S.K. Vascular plants of Russia and neighboring states (within the former USSR). Sankt-Peterburg: Mir i Semya, 1995. 992 p. (in Russian).

11. Red Data Book of the Russian Federation. Animals. Moskva: Astrel, 2001. 863 p. (in Russian).

12. Mineral resources of the Kirov region. Kirov, 2003. 2000 p. (in Russian).

13. Field guide to soils of Russia. Moskva: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchaeva, 2008. 182 p. (in Russian).

14. Perevedentsev Yu. P., Frenkel M.O., Shaymardanov M.Z. Modern changes in climatic conditions and resources of the Kirov region. Kazan: Kazan. gos. un-t, 2010. 242 p. (in Russian).

15. Vegetation of the European part of the USSR. Leningrad, 1980. 429 p. (in Russian).

16. Hagemeijer E.J.M., Blair M.J. The EBCC atlas of European breeding birds. Calton: European Bird Census Council (EBCC), 1993. 903 p.

17. Bibbi K., Dzhons M., Marsden S. Field research methods. Research and counts of birds. Moskva: Soyuz okhrany ptits Rossii, 2000. 186 p. (in Russian).

18. Sotnikov V.N. Annotated list of vertebrates of the Kirov region. Kirov: OOO "Triada plyus", 2018. 60 p. (in Russian).

19. Key ornithological territories of Russia. V. 1. Key bird areas of international importance in European Russia / Eds. T.V. Sviridova, V.A. Zubakin. Moskva: Soyuz okhrany ptits Rossii, 2000. 702 p. (in Russian).

УДК 628.1 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-118-125

Ресурсная и экологическая эффективность гальванического производства: вопросы водопотребления

© 2021. Е. Г. Винокуров[1, 2], д. х. н., профессор,
Х. А. Невмятуллина[1, 2], к. т. н., доцент,
Т. В. Гусева[3], д. т. н., профессор, заместитель директора,
И. С. Курошев[3], начальник отдела,
[1]Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,
[2]Всероссийский институт научной и технической информации РАН,
125190, Россия, г. Москва, ул. Усиевича, д. 20,
[3]Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»,
115054, Россия, г. Москва, Стремянный пер., д. 38,
e-mail: vin-62@mail.ru

Проведён анализ возможностей повышения ресурсной и экологической эффективности гальванического производства. Цель исследования – проанализировать причины изменения водоёмкости операций гальванотехники и оценить возможности её снижения с учётом наилучших доступных технологий. Обобщены данные различных литературных источников, характеризующих величину уноса раствора для различных периодов развития технологии. Показано, что средний удельный унос раствора составляет 0,065 л/м^2 и может являться обоснованным значением для установления оптимальных технологических показателей при проектировании гальванических линий. Установлено, что годовой объём потребляемой воды в соответствии с действующими нормативными документами превышает в 2,5 раза объём, рассчитанный по результатам научных исследований. Отмечена целесообразность проведения бенчмаркинга и установления количественных требований к ресурсной и экологической эффективности производства при актуализации документов по наилучшим доступным технологиям.

Ключевые слова: экологическая эффективность, ресурсная эффективность, гальваническое производство, водопотребление, унос раствора, покрытия, промывные воды.

Resource efficiency and environmental performance of electroplating processes: water consumption aspects

© 2021. E. G. Vinokurov[1, 2] ORCID: 0000-0002-5376-0586,
Kh. A. Nevmyatullina[1, 2] ORCID: 0000-0002-5519-467X,
T. V. Guseva[3] ORCID: 0000-0001-5399-6196, I. S. Kuroshev[4] ORCID: 0000-0003-2398-6776,
[1]D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047,
[2]All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, RAS,
20, Usievicha St., Moscow, Russia, 125190,
[3]Research Institute "Environmental Industrial Policy Centre",
38, Stremyanny Pereulok, Moscow, Russia, 115054,
e-mail: vin-62@mail.ru

The article analyses opportunities for enhancing resource and environmental efficiency of modern electroplating processes. These parameters highly depend on metal and water use efficiency. Water is consumed primarily for washing details after the plating. Authors analyse reasons for changing water intensity of electroplating processes and opportunities for reducing water consumption while implementing Best Available Techniques (BAT). Data on solution carry-over published in the research literature, norms and standards are compared. Various periods of the technology development and environmental regulation are considered (1939 to date). Specific water consumption grows since 1970s which is caused both by the increase of concentrations of main components of technological solutions and by the introduction of GOST 9.047-75 standard. The standard sets an elevated solution carry-over value: if in 1959–1968, this value varied between 0.055 and 0.073 L/m^2, in 1972 the new value was set at 0.2 L/m^2. Authors assume that this decision was caused

by the environmental regulation requirements which became more stringent at that time. Increased solution carry-over norms allowed using water to dilute wastewater and thereby to reduce concentrations of contaminants. The average solution carry-over value is 0.065 L/m^2, while the most probable values vary between 0.04 and 0.08 L/m^2 and may be considered as environmentally and resource sound when setting BAT requirements for designing electroplating processes. For the two-stage washing process, parameter ($qK^{1/2}$) is calculated. This parameter characterises the specific washing water volume. Annual water consumption in the electroplating processes is assessed. The consumption calculated based on existing norms, varies from 3.4 to 6.2 mln m^3 per year; it is 2.5 times higher than the consumption reported in the research articles.

Keywords: environmental performance, resource efficiency, electroplating, water consumption, solution carry-over, metal coating, washwater.

В различных отраслях промышленности (наиболее активно с 1920 г. [1]) используют электрохимическое или химическое нанесение металлических покрытий. Часто гальванические производства характеризуются значительным разнообразием покрытий при сравнительно небольшой производственной программе по каждому из них [2].

В работе [3] показано, что в Европейском союзе и в Российской Федерации (РФ) нанесение покрытий отнесено к категории производственных процессов, требующих особого внимания в связи с потенциально значимым негативным воздействием на окружающую среду (ОС). Экологическое регулирование таких производственных процессов осуществляется на основе концепции наилучших доступных технологий (НДТ). В экологическом плане гальваника создаёт две основные и взаимосвязанные проблемы. Первая – высокая водоёмкость производства и вторая – загрязнение ОС за счёт сброса сточных вод. Отчасти вторая проблема решается за счёт усугубления первой: снижение концентрации загрязняющих веществ нередко достигается путём разбавления растворов, что приводит к росту объёмов потребляемой воды.

Ежегодно в РФ электрохимическим методом обрабатывается 200–370 млн м^2 поверхности [3]. Гальваническое производство является крупным потребителем важных природных ресурсов (цветные металлы и вода), а показатели ресурсоэффективности [3] свидетельствуют о нерациональном использовании материалов: в технологических растворах находятся десятки миллионов тонн цветных металлов; непосредственно на покрытия расходуется десятки тысяч тонн, а в сточные воды уносятся тысячи тонн. По разным оценкам [4, 5] для гальванохимии поступление загрязняющих веществ в ОС со сточными водами составляет 83–85% и, следовательно, при совершенствовании технологического нормирования приоритетное внимание следует уделять повышению эффективности использования воды. Анализ факторов воздействия на ОС гальванохимического производства определяется, прежде всего, концентрацией компонентов технологических растворов и величиной их удельного уноса поверхностью деталей [6–8].

В РФ предприятия, производящие работы «по поверхностной обработке металлов и пластических материалов (с технологических ванн суммарным объёмом 30 м^3 и более)», отнесены к I категории негативного воздействия на ОС [9], что обязывает их применять НДТ. Для гальванического производства разработан информационно-технический справочник (ИТС) по НДТ (ИТС 36-2017 «Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов»), в котором ключевое внимание уделяется решениям, направленным на повышение ресурсной эффективности применяемых процессов и снижению негативного воздействия на ОС.

Сокращение уноса технологических растворов обрабатываемой поверхностью, контроль концентрации загрязняющих веществ в сточных водах являются важными задачами обеспечения экономической, ресурсной и экологической эффективности гальванических производств. Анализ опубликованных результатов указывает на актуальность и необходимость формирования научно обоснованных подходов к минимизации таких потерь.

Цель исследования – проанализировать причины изменения водоёмкости при гальванохимическом нанесении покрытий и оценить возможности её снижения в условиях перехода к технологическому нормированию в сфере охраны окружающей среды на основе наилучших доступных технологий.

Современное состояние изученности проблемы

В производственной деятельности предприятия ориентируются на действующие нормативные документы, регламенты и стандарты. В СССР нормативные требования к воде для промывок впервые были определены

в стандарте на покрытия (ГОСТ 9.047-75), а затем в документах, устанавливающих требования к воде для гальванического производства (ГОСТ 9.314-90, ГОСТ Р 58431-2019). Следует заметить, что такие показатели, как удельный унос раствора и концентрация компонентов в последней ванне промывки во всех документах практически одинаковы.

В гальванических цехах начинают внедряться элементы бережливого производства [10], главной задачей которого является устранение потерь, в данном контексте это относится, прежде всего, к ресурсам воды.

Объём промывных сточных вод и концентрация в них загрязняющих веществ определяют технологию очистки, состав оборудования очистных сооружений и их производительность [11]. До последнего времени предприятия должны были обосновывать нормативы допустимого сброса таким образом, чтобы в принимающем водном объекте не превышался уровень предельно допустимых концентраций (ПДК). Требования ПДК загрязняющих веществ для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения являются весьма жёсткими [12, 13]. Это обстоятельство приводит к тому, что водопользователи в стремлении продемонстрировать соблюдение требований увеличивают объёмы воды, используемой в производстве.

С 2019 г. предприятия I категории рассчитывают технологические нормативы, основанные на отраслевых показателях НДТ. Для гальванических производств такие показатели не установлены; вероятно, их обоснование произойдёт во время актуализации ИТС 36-2017 (до 2024 г.). В соответствии с поручением Президента РФ в актуализированном ИТС 36-2017 будет усилено внимание к ресурсосбережению [14]. Предполагается, что для выделения так называемого «зелёного» финансирования будет учитываться достижение показателей ресурсоэффективности.

В научно-технической литературе опубликовано достаточно много работ, посвящённых исследованиям в области снижения негативной нагрузки на ОС. Так, в [6, 15, 16] для повышения ресурсной и экологической эффективности гальванического производства предлагается использовать низкоконцентрированные растворы. Авторы [17] исследовали характеристики нового оборудования, которое предусматривает повторное использование в технологическом процессе промывных вод.

Приведённые данные заставляют задуматься о перспективах развития водного хозяйства промышленных предприятий. Объём воды, используемой на производстве, должен сводиться к возможному минимуму; во многих ИТС к наилучшим доступным техническим решениям отнесены водооборотные циклы. Значительно изменилась и экономическая ситуация. С точки зрения микроэкономики (затрат предприятий) обычно обсуждается рост тарифов на воду, ставок платежей за негативное воздействие на водные объекты, а также штрафов за несоблюдение установленных требований. Однако более значимыми представляются аспекты устойчивого развития. Принятые на международном уровне цели устойчивого развития (ЦУР) требуют перехода к ответственным моделям производства и потребления (ЦУР 12) и обеспечения доступа к чистой воде (ЦУР 9). Эти цели коррелируют с национальными целями развития РФ, а критерии «зелёного» финансирования содержат показатели ресурсной и экологической эффективности производства [18].

Таким образом, для повышения рентабельности гальванических производств, обеспечения доступа к «зелёному финансированию» и снижения репутационных рисков необходимо разрабатывать курс действий по оптимизации водопотребления. При этом приоритетное внимание следует уделить наиболее водоёмкой стадии – промывке деталей после операций электроосаждения металлов [19].

Сравнительный анализ требований к эффективности использования воды в гальванических процессах

В таблице 1 на основе опубликованных данных приведены для различных периодов времени величины основных факторов (удельный унос и концентрация компонентов в технологическом растворе и последней ванне промывки), определяющих ресурсную и экологическую эффективность гальванических производств. По этим данным в условиях двухступенчатой промывки по методике, описанной в ГОСТ Р 58431-2019, рассчитана величина ($qK^{1/2}$), характеризующая удельный объём промывной воды и не зависящая от площади обрабатываемой продукции. Динамика $qK^{1/2}$ для потребления воды после нанесения покрытий никелем и хромом представлена на рисунке 1.

Потребление воды до 1968 г. было примерно одинаковым и минимальным по сравнению с последующими периодами. Приблизительно с 1970-х гг. расход воды увеличился, что связа-

Таблица 1 / Table 1

Характеристики параметров промывки в гальванических процессах, приведённые в различных источниках
Washing parameters described in various information sources

Параметры промывки Washing parameters	Периоды времени, год / Time, years								
	1939–1948	1949–1958	1959–1968	1969–1978	1979–1988	1989–1998	1999–2008	2009–2018	2019
Никелирование / Nickel plating									
Удельный унос технологического раствора никелирования (q), л/м^2 / Specific technological solution carry-out, Nickel plating (q), L/m^2	0,080 [20]	0,125 [21]	0,073 [22]	0,15 [24], 0,20 (ГОСТ 9.047-75)	0,080 [25] 0,200 [26], (ГОСТ 9.047-75)	0,200 [7], (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ 9.314-90)		0,200 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация ионов никеля в последней ванне промывки (c_{Ni}), мг/л / Ni ions concentration in the last washing basin (c_{Ni}), mg/L	10	10	10	10 (ГОСТ 9.047-75)	10 [26, 27], (ГОСТ 9.047-75)	10 [7], (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ 9.314-90)		10 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация ионов никеля в технологическом растворе (c_{Ni}), г/л [15] / Ni ions concentration in technological solutions, (c_{Ni}), g/L [15]	32	32	40	46	61	61	71	71	71
Коэффициент разбавления (K_{Ni}) Dilution coefficient (K_{Ni})	3200	3200	4000	4600	6100	6100	7100	7100	7100
Удельный расход воды на промывку после никелирования (qK^{0,5}), л/м^2 / Specific washing water consumption, Nickel plating ($qK^{0,5}$), L/m^2	4,5	7,1	4,6	10,2–13,6	6,2–15,6	15,6	16,8	16,8	16,8
Хромирование / Chromium plating									
Удельный унос технологического раствора хромирования (q), л/м^2 / Specific technological solution carry-out (q), Chromium plating, L/m^2	0,150 [20]	0,125 [21]	0,055 [22]	0,117 [24] 0,20 (ГОСТ 9.047-75)	0,180–0,380 [26] 0,200 [26], (ГОСТ 9.047-75)	0,200 [7], (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ 9.314-90)		0,200 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация хрома в последней ванне промывки (c_{Cr}), мг/л / Cr ions concentration in the last washing basin (c_{Cr}), mg/L	73	73	73 [23]	10 (ГОСТ 9.047-75)	12 [25], 10 [26, 27], (ГОСТ 9.047-75)	10 [7], (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ 9.314-90)		10 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация ионов хрома в технологическом растворе (c_{Cr}), г/л [15] / Cr ions concentration in technological solutions (c_{Cr}), g/L [15]	156	156	150	140	138	118	118	104	104
Коэффициент разбавления (K_{Cr}) Dilution coefficient (K_{Cr})	2137	2137	2137	11667	12545	11800	11800	10400	10400
Удельный расход воды на промывку после хромирования ($qK^{0,5}$), л/м^2 / Specific washing water consumption, Chromium plating ($qK^{0,5}$), L/m^2	6,9	5,8	2,5	12,6	22,4	21,7	21,7	20,4	20,4

но (табл. 1) как с повышением концентрации, например, никеля в технологических растворах [15] или уменьшением концентрации хрома в последней ванне промывки, так и с введением в 1975 г. (ГОСТ 9.047-75) увеличенных значений удельного уноса растворов (в 1959–1968 гг. – 0,055–0,073 л/м^2, в 1975 г. – 0,2 л/м^2).

Постепенно меняющиеся методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты используют подходы, которые были разработаны именно в 1970–1980-е годы, то есть, вероятно, что увеличенные нормативы уноса были связаны с ужесточением природоохранных требований.

Завышение значений удельного уноса растворов сверх необходимого приводит к росту объёма воды, потребляемой для уменьшения концентрации загрязняющих веществ в последней ванне промывки и, соответственно, в сточных водах в целом.

В работе [28] показано, что концентрация отмываемого компонента в последней ванне промывки за достаточно долгое время не успевает достичь ПДК$_в$. Эти результаты подтверждают цель введения завышенных значений удельного уноса и вызывают сомнения в научной обоснованности нормированных значений (ГОСТ Р 58431-2019).

В работе [29] с помощью радиометрического метода (в качестве метки использовался изотоп ^{82}Br, время стекания раствора 10 с) определён удельный унос (в л/м^2) различных электролитов: для никелирования, цинкования – 0,029–0,047, для обезжиривания – 0,048, для хромирования – 0,018, для травления в HCl – 0,051–0,073, для процесса активации в H_2SO_4 – 0,094. Также показано [30], что для растворов с низким поверхностным натяжением (щелочные растворы и растворы с поверхностно активными веществами) величины удельного уноса уменьшаются до 0,035 л/м^2 по сравнению с данными для кислых и нейтральных растворов с высоким поверхностным натяжением (0,04 л/м^2). Аналогичные результаты получены и другими авторами [31]: для кислых растворов меднения удельный унос составляет 0,013–0,021 л/м^2, для раствора никелирования – 0,013–0,040 л/м^2. Приведённые значения также не противоречат величинам, используемым до 1968 г. (табл. 1): 0,055; 0,073; 0,080; 0,125; 0,150 л/м^2. Статистическая обработка всех приведённых значений позволила получить их распределение (рис. 2), согласно которому среднее значение удельного уноса раствора составляет 0,065 л/м^2, а наиболее вероятная величина лежит в диапазоне 0,04–0,08 л/м^2 и может являться научно-обоснованным значением для применения в нормативно-технической документации и использоваться при проектировании гальванических линий с целью оптимизации промывных операций и снижения поступления загрязняющих веществ в сточные воды.

Используя научно обоснованные значения удельного уноса раствора 0,065 л/м^2 и рекомендуемые ГОСТ Р 58431-2019, оценим годовой расход воды на промывку, основываясь на данных [3] о площади обрабатываемой поверхности в год и методике расчётов по ГОСТ Р 58431-2019 для двухступенчатой противоточной промывки (табл. 2).

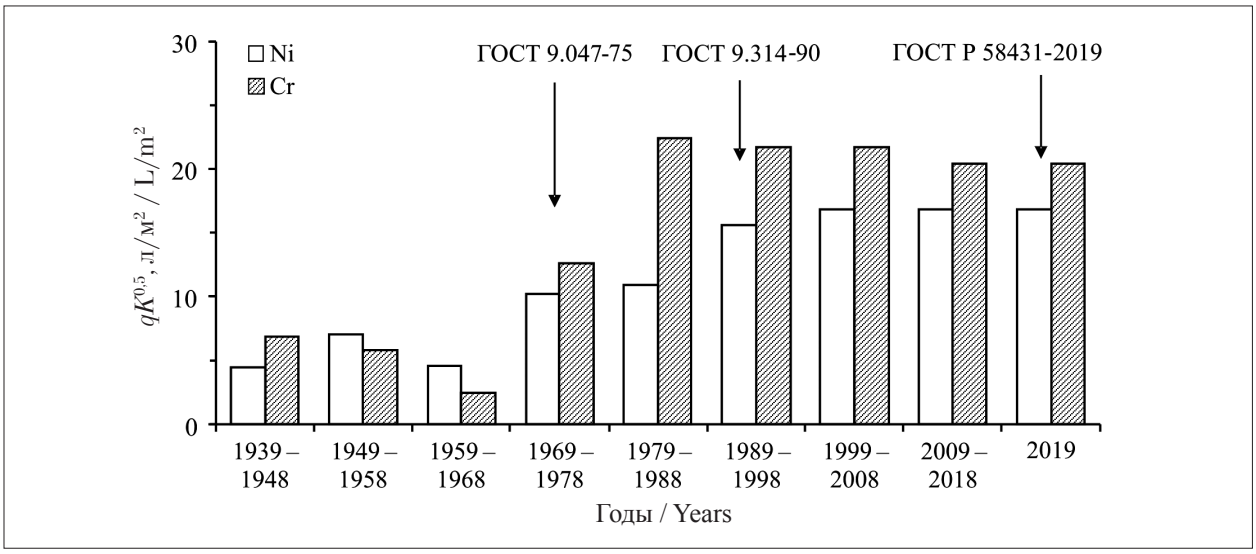


Рис. 1. Динамика удельного потребления воды на промывки ($qK^{0,5}$) после никелирования и хромирования
Fig. 1. Dynamics of specific washing water consumption ($qK^{0,5}$) after Nickel and Chromium plating

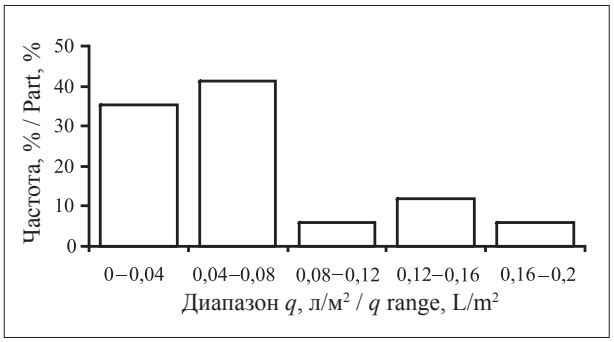


Рис. 2. Статистическое распределение значений удельного уноса технологических растворов
Fig. 2. Statistic distribution of the specific technological solution carry-out

Исходя из данных таблицы 2, несложно оценить, насколько эффективно используются ресурсы воды. Объём воды, потребляемой согласно нормативным документам, превышает в 2,5 раза объём, рассчитанный по данным научных исследований. Безусловно, эти численные значения носят ориентировочный характер, но их соотношение заставляет задуматься об обоснованности применяемых норм, в конечном счёте, о ресурсной и экологической эффективности отечественных предприятий.

Эти обстоятельства следует учесть при актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 36-2017. При проведении бенчмаркинга (сравнительного анализа показателей деятельности предприятий) целесообразно использовать не только данные анкетирования, но и результаты научно-исследовательских работ. Технологические показатели НДТ, то есть показатели ресурсной (удельное потребление воды, металлов, энергии и др.) и экологической (удельный унос, концентрации загрязняющих веществ в промывных растворах и сточных водах), которые имеют обязательную силу для предприятий I категории, следует устанавливать таким образом, чтобы мотивировать предприятия к эколого-технологической модернизации, рациональному использованию ресурсов и применению принципов бережливого производства.

Заключение

Водопотребление в гальваническом производстве за последние 30 лет значительно возросло: годовой объём потребляемой воды достигает 3,4–6,2 млн м^3. Расчёты на основе статистической оценки значения удельного уноса раствора (0,065 л/м^2) позволяют предположить, что объём воды на промывные операции можно сократить в 2,5 раза. При проектировании гальванических линий целесообразно руководствоваться научно обоснованными значениями удельного уноса. Эти критерии могут найти применение при установлении количественных требований к ресурсной и экологической эффективности

Таблица 2 / Table 2

Годовой расход воды на промывки при гальванохимическом нанесении покрытий
Annual water consumption for washing operations in electroplating processes

Показатель Parameter	ГОСТ Р 58431-2019 GOST R 58431-2019	Научно-обоснованные показатели Research-based parameters
Площадь обрабатываемой поверхности, млн м^2/год [3] Surface plated, mln m^2/year [3]	200–370	
Удельный унос раствора, л/м^2 Specific solution carry-over, L/m^2	0,2	0,065
Концентрация отмываемого компонента (на примере соединений никеля) в последней ванне промывки, г/л Concentration of the component to be washed out (Ni) in the last washing basin, g/L	0,01	0,01
Среднее значение концентрации ионов никеля в технологическом растворе, г/л [15] Average concentration of Ni ions in the technological solution, g/L [15]	71	
$qK^{0,5}$	16,8	6,5
Объём потребляемой воды на промывки, млн м^3/год Annual water consumption, mln m^3/year	3,4–6,2	1,3–2,4
Неэффективность использования, % / Inefficiency, %	160	

производства в ИТС 36-2017 «Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов».

Работа выполнена в рамках ГЗ 020-00002-21-01.

References

1. Budreiko E.N. Historical approach to the industrial electroplating (1870–1920) // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2017. V. 25. No. 2. P. 14–19 (in Russian). doi: 10.47188/ 0869-5326_2017_25_1_8

2. Jelinek T.V. Advances in metal finishing – an assessment of the international literature 2017–2018 // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2019. V. 27. No. 2. P. 4–8 (in Russian). doi: 10.47188/0869-5326_2019_27_2_4

3. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Guseva T.V. Electroplating industry in Russia: assessment approach, improvement tasks of resource and environmental effectiveness // Tekhnologiya metallov. 2020. No. 7. P. 2–6 (in Russian). doi: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-2-6

4. Pal'gunov P.P., Sumarokov M.V. Utilization of industrial waste. Moskva: Stroyizdat, 1990. 352 p. (inRussian).

5. Fellenberg G. Pollution of the natural environment. Introduction to environmental chemistry. Moskva: Mir, 1997. 232 p. (in Russian).

6. Khranilov Yu.P. Ecology and electroplating: problems and solutions. Kirov: Izd. VyatGU, 2000. 97 p. (in Russian).

7. Zubchenko V.L., Zakharov V.I., Rogov V.M. Kovalev V.V., Mareichev A.V., Shenderov Yu.D., Shilin A.I. Flexible automated galvanic lines: A Handbook / Ed. V.L. Zubchenko. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 672 p. (in Russian).

8. Kolesnikov V.A., Il'in V.I. Ecology and resource conservation in electrochemical industries. Mechanical and physicochemical methods of cleaning rinsing and waste water. Moskva: D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2004. 220 p. (in Russian).

9. Decree of the Government of the Russian Federation of December 31, 2020 No. 2398 "On the approval of criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment to objects of I, II, III and IV categories" [Internet resource] http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202101040010 / (Accessed: 24.01.2021) (in Russian).

10. Andreev I.A. Use of lean manufacturing tools in an electroplating shop // Vestnik Kontserna VKO "Almaz-Antei". 2020. No. 2. P. 32–44 (in Russian). doi: 10.38013/2542-0542-2020-2-32-44

11. Rodionov A.I., Klushin V.N., Sister V.G. Environmental safety technological processes. Kaluga: Izdatel'stvo N. Bochkarevoy, 2000. 800 p. (in Russian).

12. Bespamyatnov G.P., Krotov Yu.A. Maximum allowable concentration of chemicals in the environment. Leningrad: Khimiya Leningr. otd-nie, 1985. 528 p. (in Russian).

13. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Order 552 dated December 13, 2016 "On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies" (as amended on March 10, 2020) [Internet resource] http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006/ (Accessed: 24.01.2021) (in Russian).

14. The list of instructions of the President of the Russian Federation based on the results of checking the implementation of the provisions of the legislation of the Russian Federation on the management of industrial and consumer waste classified as hazard class III dated September 16, 2020. Project 1489, p. 1b-1 [Internet resource] http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/64046/ (Accessed: 24.01.2021) (in Russian).

15. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Kolesnikov V.A., Fadina S.V. Concentration criterion for classifying resource-saving compositions of solutions for metal electroplating // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. V. 46. No. 5. P. 486–491. doi: 10.1134/S004057951205020X

16. Fadina S.V., Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Kolesnikov V.A. Total concentration of main components in solutions for metal electroplating as a criterion for classifying and choosing resource-saving compositions of solutions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. V. 47. No. 5. P. 593–599. doi: 10.7868/S0040357113040052

17. Nester A.A., Nikitin A.A., Romanishina O.V., Mysliborskij V.V., Ataev S.V., Tyutyunnik O.S., Gordij N.M. Economic effect of environmental safety of galvanic production // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 86–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-086-092

18. Skobelev D.O. Resource efficiency of the economy: strategic planning aspects // Menedzhment v Rossii i za rubezhom. 2020. No. 4. P. 3–13 (in Russian).

19. Kazakov V.A., Vinogradov O.S., Gulyaeva N.A., Krevskii I.G. Software for waterconsuming minimization in electroplating at the stage of water filtering // Otkrytoe obrazovanie. 2011. No. 2. P. 251–254 (in Russian).

20. Shvyryaev G.K., Trespe G.G. Corrosion and fight against it. 1941 [Quote from Lainer V.I., Kudryavtsev N.T. The basics of pity vanity. Moskva: Metallurgizdat, 1957. V. 2. 647 p. (in Russian)].

21. Bakhvalov G.T., Birkgan L.N., Labutin V.P. Electroplating directory. Moskva: Metallurgizdat, 1954. 651 p. (in Russian).

22. Krusenstjern A., Schmidt G. Verschleppungsverluste galvanischer Bäder. Metalloberfläche, 1961. No. 10. [Quote from Pletnev D.V., Brusentsova V.N. Fundamentals of the technology of wear-resistant and antifriction coatings. Moskva: Mechanical Engineering, 1968. 272 p. (in Russian)].

23. Bartl D., Mudrokh O. Technology of chemical and electrochemical treatment of metal surfaces. Moskva: Mashgiz, 1961. 712 p. (in Russian).

24. Yampol'skii A.M., Il'in V.A. A short guide to electroplating. Leningrad: Mashinostroenie, 1972. 224 p. (in Russian).

25 Mel'nikov P.S. Handbook of electroplating in mechanical engineering. Moskva: Mashinostroenie, 1979. 296 p. (in Russian).

26. Yampol'skii A.M., Il'in V.A. A short guide to electroplating. Leningrad: Mashinostroenie, 1981. 269 p. (in Russian).

27. Azhogin F.F. Electroplating. Moskva: Metallurgiya, 1987. 736 p. (in Russian).

28. Domrachev R.A., Shishkina S.V., Mamaev V.I. A software package for calculating the balance of toxic heavy metals and optimizing washing operations in electroplating industries // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2002. V. 10. No. 3. P. 51–55 (in Russian).

29. Suss M. Bestimmung elektrolytspezifisher Ausschleppverluste // Galvanotechnik. 1992. V. 83. No. 2. P. 462 (in German).

30. Domrachev R.A., Shishkina S.V., Mamaev V.I. Investigation of the specific entrainment of a solution with parts from technological baths // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2003. V. 11. No. 4. P. 11–12 (in Russian).

31. Fadina S.V., Burukhina T.F., Vinokurov E.G. Physical-chemical properties of solutions and the reduction of their loss caused by drag-out // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2015. V. 23. No. 3. P. 47–52 (in Russian).

УДК 536.521+502.36 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-126-132

Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения

© 2021. В. А. Кузьмин[1], д. т. н., профессор,
И. А. Заграй[1], к. т. н., доцент,
И. А. Десятков[2], главный энергетик,
[1]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, Московская, д. 36,
[2]АО «ВяткаТорф»,
610017, Россия, г. Киров, ул. Маклина, д. 31,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

В котельных агрегатах промышленной теплоэнергетики довольно часто используется факельное сжигание углей и, реже, торфа. Высокая температура продуктов сгорания, с одной стороны, является показателем эффективности работы котлов, но, с другой стороны, может вызывать высокий уровень образования оксидов азота, в значительной мере обусловливающих загрязнение атмосферного воздуха в районах размещения теплоэнергетических предприятий. Для поддержания определённого уровня образования оксидов азота необходимо поддерживать постоянным и стабильным уровень температуры продуктов сгорания. В данной работе для определения температуры предложена методика с использованием пирометра Optris с рабочей длиной волны 4,24 мкм в полосе поглощения CO_2. На разных высотах топки котла получены экспериментальные зависимости температуры продуктов сгорания от установленной на пирометре излучательной способности. Приведены результаты определения температуры продуктов сгорания в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа и угля. Текущий контроль уровня температуры продуктов сгорания позволяет поддерживать образование оксидов азота на требуемом экологически безопасном уровне.

Ключевые слова: температура продуктов сгорания, оксиды азота, факельное сжигание угля или торфа, излучательная способность, пирометрия, паровой котёл.

Monitoring the formation of nitrogen oxides in the furnace of a steam boiler for protection of atmospheric air from pollution

© 2021. V. A. Kuzmin[1] ORCID: 0000-0001-9979-4610,
I. A. Zagrai[1] ORCID: 0000-0002-8886-8677,
I. A. Desiatkov[2] ORCID: 0000-0002-0532-2960,
[1]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[2]AO "VyatkaTorf",
31, Maklina St., Kirov, Russia, 610017,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

Flaring of coals and, less often, peat is often used in boilers of industrial heat power engineering. High temperature of combustion products can be an indicator of the efficiency of boilers. But it can cause a high level of nitrogen oxides formation posing a threat of air pollution. Therefore, it is necessary to maintain a constant and stable temperature level to keep a certain level of nitrogen oxides formation. This paper presents a method for determining the temperature of combustion products using an Optris pyrometer with an operating wavelength of 4.24 μm in the CO_2 absorption band. For the different heights of the boiler furnace, the experimental dependences of the temperature of combustion products on the emissivity set on the pyrometer are obtained. The results of determining the temperature of combustion products in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler during flaring of peat and coal are presented. Current control of the temperature level of combustion products allows to maintain the required environmentally safe level of nitrogen oxides formation.

Keywords: temperature of combustion products, nitrogen oxides, flaring of coal or peat, emissivity, pyrometry, steam boilers.

Основными источниками вредных выбросов в атмосферу являются продукты сгорания тепловых электрических станций (ТЭС), котельных и промышленных предприятий. При сжигании органических топлив в атмосферу с дымовыми газами котлов попадает большое количество вредных веществ: оксидов азота (NO, NO_2, N_2O), оксидов серы (SO_2, SO_3), оксидов углерода (CO и CO_2), твёрдых частиц золы и т. д. [1–3].

Самыми экологически опасными выбросами являются оксиды азота NO_x ($NO+NO_2$), которые образуются при горении топлива в результате химической реакции азота (содержащегося в топливе и воздухе) с кислородом. Выбросы оксидов азота (в основном состоящие из NO) в атмосферу негативно воздействуют на здоровье людей, раздражая дыхательные пути и увеличивая тем самым количество острых и хронических респираторных заболеваний. Оксиды азота NO_2 (вместе с оксидами серы), соединяясь с атмосферной влагой, образуют «кислотные дожди», которые негативно влияют на растительный и животный мир, вызывают разрушение материалов и конструкций, и как следствие, приводят к серьёзным экономическим последствиям [3, 4].

При сжигании всех видов твёрдого топлива доля топливных NO велика и может составлять до 100% общего выброса NO_x. Образование топливных оксидов азота происходит при небольших температурах при выходе летучих веществ из топлива (торфа, угля). Низкого выхода NO_x можно достичь при сжигании обеднённых смесей с высоким коэффициентом избытка воздуха α. При увеличении α температура пламени снижается и образование оксидов азота уменьшается. При этом уменьшается скорость превращения CO в CO_2. Предельное значение концентрации угарного газа определяет верхнюю границу для величины α, и, соответственно, минимально возможную температуру пламени [5].

Зависимость концентрации топливных оксидов азота NO_x от температуры продуктов сгорания и времени пребывания их в топке представлены на рисунке 1 (см. цв. вкладку VI). [6]. Чем выше температура, тем быстрее происходит образование топливных NO_x. Из графиков следует, что при низких температурах выполняется условие высокой экологической безопасности (низкие значения концентрации оксидов азота), однако это снижает эффективность работы котлов. Температурный уровень оказывает влияние на максимальную концентрацию NO_x только при невысоких температурах. При значениях температуры более 1570 К конечная концентрация NO_x становится примерно одинаковой (900 мг/м^3).

С повышением температуры продуктов сгорания повышается КПД котла, но ухудшаются экологические показатели. Согласно директиве ЕС [7], с 2016 г. для действующих котельных установок тепловой мощностью более 100 МВт предельные выбросы NO_x ограничены 200 мг/м^3 при сжигании угля [4]. При сжигании торфа ограничение составляет 250 мг/м^3 для установок мощностью 100–300 МВт и 200 мг/м^3 для установок мощностью более 300 МВт. Авторы работы [8], в зависимости от топливного коэффициента (отношение связанного углерода к выходу летучих) различных марок углей, сжигаемых на ТЭС России, предлагают установить разные допустимые нормы по выбросам NO_x в атмосферу.

Рассмотрим проблему оптимизации режимов сжигания топлива с энергетической и экологической точек зрения на примере котлоагрегата БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Контроль температуры факела, обеспечивающей минимально возможную эмиссию NO_x, может осуществляться несколькими способами: с помощью газоанализаторов (ДАГ-500 и др.), пирометрическими способами или по температуре уходящих газов. Так как применение газоанализаторов носит эпизодический характер, а температура уходящих газов не даёт полной картины о распределении температур по высоте факела, для постоянного контроля и измерения температуры горения в топке парового котла БКЗ-210-140Ф наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения. Следует отметить, что существующие бесконтактные методы измерения температуры продуктов сгорания в топках энергетических котлов на данный момент не являются универсальными, и их использование возможно только после предварительного изучения параметров котлоагрегата, особенностей используемого топлива и спектра излучения продуктов сгорания.

Целью настоящей работы является оптимизация метода пирометрического определения температуры продуктов сгорания по полосе поглощения CO_2 с последующим контролем образования оксидов азота при факельном сжигании твёрдых топлив в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

Объекты и методы исследования

Паровой котёл БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании твёрдых топлив исполь-

Таблица 1 / Table 1

Характеристики торфа и угля / Peat and coal characteristics

Наименование показателя / Parameter	Торф / Peat	Уголь / Coal
Содержание влаги W^r, % / Moisture W^r, %	51,8	12
Зольность A^r, % / Ash content A^r, %	6,3	15
Содержание серы S^r, % / Sulfur S^r, %	0,3	0,4
Содержание углерода C^r, % / Carbon C^r, %	24,3	57,1
Содержание водорода H^r, % / Hydrogen H^r, %	2,6	4,1
Содержание азота N^r, % / Nitrogen N^r, %	1,4	1,8
Содержание кислорода O^r, % / Oxygen O^r, %	13,3	9,6
Низшая теплота сгорания Q^r, ккал/кг (кДж/кг) Lowest combustion heat Q^r, kcal/kg (kJ/kg)	1933 (8093)	3673 (15378)
Выход летучих веществ V^{daf}, % / Volatile matter content V^{daf}, %	50	42

Таблица 2 / Table 2

Состав продуктов сгорания (в %) при сжигании торфа и угля
Composition of combustion products (%) from peat and coal combustion

Состав продуктов сгорания Composition of combustion products	Торф / Peat	Уголь / Coal
Химический состав конденсированной фазы Chemical composition of condensed phase		
Содержание золы в продуктах сгорания Ash content in the combustion products	1,1	1,5
SiO_2	47,59	59,3
Al_2O_3	18,96	21
Fe_2O_3	20,84	5,7
CaO	4,88	5,3
K_2O	1,22	3,8
MgO	0,62	2,2
P_2O_5	4,02	0,8
TiO_2	0,45	0,9
Na_2O	0,38	–
SO_3	0,55	–
Химический состав газовой фазы / Chemical composition of gas phase		
Содержание газа в продуктах сгорания Gas content in the combustion products	98,9	98,5
H_2O	10,2	5,5
CO_2	17,7	20,7
SO_2	0,1	0,07
N_2	66,9	68,8
O_2	4,0	3,5

Примечание: Прочерк означает отсутствие компонента.
Note: A dash means the absence of a component.

зует фрезерный торф или уголь. Благодаря использованию местных видов топлива на Кировской ТЭЦ-4 достигается топливная независимость от поставщиков топлива на случай чрезвычайных ситуаций, а также снижаются логистические затраты. Поставки фрезерного торфа обеспечиваются с предприятия АО ВяткаТорф, расположенного в Кировской области. Поставки каменного угля, как резервного вида топлива, производятся с предприятий Кузнецкого угольного бассейна. В качестве примера приводятся характеристики торфа с месторождений Кировской области и характеристики Кузнецкого угля (табл. 1). Расход топлива в котле БКЗ-210-140Ф составляет 40,4 т/ч при сжигании торфа и 33,16 т/ч при сжигании угля.

Из таблицы 1 следует, что торф и уголь отличаются по всем показателям: зольности A^r, влажности W^r, выходу летучих веществ V^{daf},

содержанию серы S^r, калорийности Q^r и др. Из-за сравнительно низкой калорийности торф на Кировской ТЭЦ-4 сжигается в смеси с природным газом для обеспечения стабильности работы котла. Гетерогенные продукты сгорания при сжигании торфа и угля представляют собой смесь частиц конденсированной фазы (КФ) [9] и газовой фазы (ГФ). В качестве примера составы КФ и ГФ, рассчитанные по продуктам полного сгорания [10], для торфа и угля приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что состав отличается количественно, а качественно практически совпадает. Поэтому торф иногда называют молодым углём.

Основным видом переноса тепла от горящего факела и продуктов сгорания к экранным поверхностям котла является излучение (до 95%). Излучение продуктов сгорания несёт информацию о химическом составе излучающей среды, её агрегатном состоянии и температуре. Основные факторы и параметры, определяющие тепловое излучение, подробно рассмотрены в работе [11]. Для расчёта спектральных и интегральных характеристик излучения (плотностей потоков энергии излучения F_λ и излучательной способности ε_λ) необходима достоверная исходная информация по КФ и ГФ, что само по себе представляет самостоятельную и сложную задачу.

В данной работе расчёт спектральных плотностей потоков энергии излучения F_λ и спектральных излучательных способностей ε_λ проводился по разработанной нами программе «Спектр» [12]. В основе этой программы лежит решение интегро-дифференциального уравнения для гетерогенных продуктов сгорания, т. е. для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды. Для условий котла БКЗ-210-140Ф в соответствии с базой исходных данных [11] произведены расчёты характеристик излучения факела продуктов сгорания в спектральном интервале λ = 1–10 мкм при сжигании торфа и угля. Некоторые результаты расчётов представлены на рисунке 2 (см. цв. вкладку VI). Из характера F_λ и ε_λ следует, что в интервале λ = 1–10 мкм на сплошной спектр КФ накладывается ярко выраженный селективный спектр ГФ (рис. 2). Из всех полос излучения – H_2O (λ = 1,9 мкм, λ = 2,7 мкм), CO_2 (λ = 4,1–4,4 мкм) и т. д. наиболее представительной и стабильной является полоса CO_2 как при сжигании торфа, так и угля. Отличие спектров F_λ, ε_λ для торфа и угля в окнах прозрачности газовой фазы (1,6 мкм, 3,9 мкм и др.) возникает из-за различия массовой доли частиц КФ при сжигании торфа и угля. Для изучения продуктов сгорания бесконтактным оптическим методом выбран пирометр Optris CTlaser F2 с рабочей длиной волны излучения λ = 4,24 мкм для полосы поглощения CO_2.

Кажущаяся простота определения температуры пирометрическим способом является настолько заманчивой, что многие исследователи используют пирометрический метод, не уделяя должного внимания выбору устанавливаемой на пирометрах величины ε, которая зависит от большого числа факторов. Мы для этой цели пользовались программой «Спектр», достоверность расчётов по которой была подтверждена в работе [11] сопоставлением с расчётными и экспериментальными данными [13, 14] для более жёстких условий.

В таблице 3 представлены некоторые расчётные значения спектральной излучательной способности ε_λ (λ = 4,24 мкм), которая устанавливается на пирометре с соответствующим приёмником излучения и даёт возможность корректного определения температуры продуктов сгорания бесконтактным методом.

На котле БКЗ-210-140Ф на различных режимах работы при сжигании торфа и угля с помощью пирометра Optris замеряли температуру продуктов сгорания в зависимости от установленной на пирометре ε_λ в пределах 0,5–1,0 с шагом $\Delta\varepsilon$ = 0,1. Схема котла БКЗ-210-140Ф с расположением смотровых лючков представлена на рисунке 3.

Результаты и обсуждение

Экспериментальное измерение температуры продуктов сгорания при сжигании торфа

Таблица 3 / Table 3

Расчетные значения спектральной излучательной способности ε_λ при сжигании торфа и угля
Calculated values of emissivity factor ε_λ from peat and coal combustion

Заданная температура *T*, К / The set temperature *T*, К	Торф / Peat	Уголь / Coal
873	0,852	0,815
1073	0,922	0,898
1273	0,964	0,947
1473	0,986	0,975

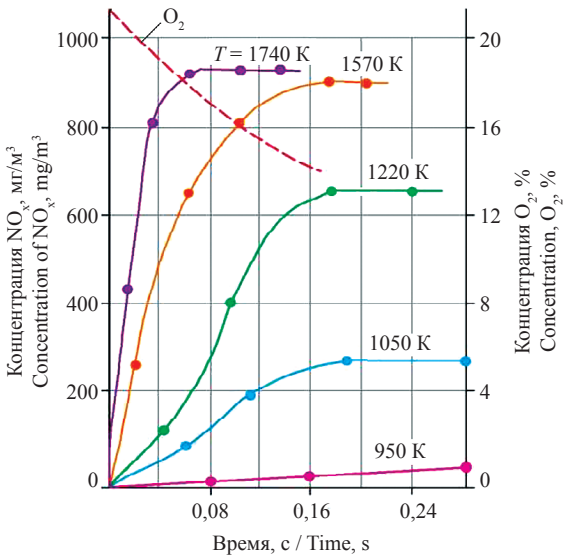


Рис. 1. Влияние температуры на образование топливных оксидов азота при сжигании угольной пыли [6]
Fig. 1. Influence of temperature on the formation of fuel nitrogen oxides during the coal dust combustion [6]

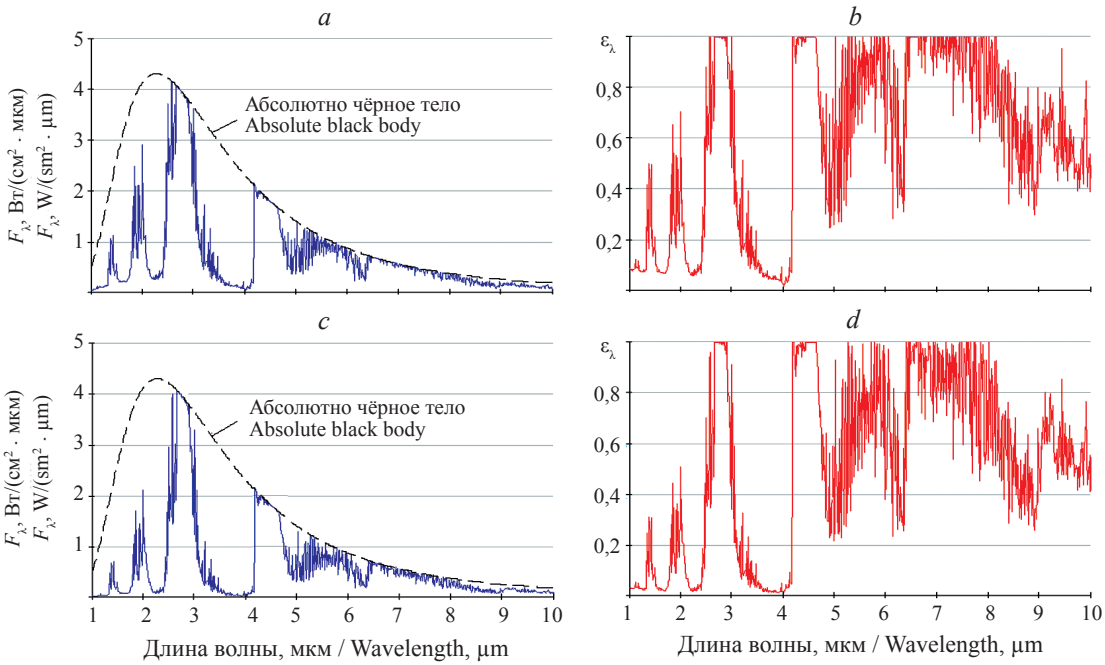


Рис. 2. Характеристики излучения продуктов сгорания при сжигании торфа (*a*, *b*) и угля (*c*, *d*) при $T = 1273$ К
Fig. 2. Emission characteristics of combustion products from peat (*a*, *b*) and coal (*c*, *d*) combustion at $T = 1273$ K

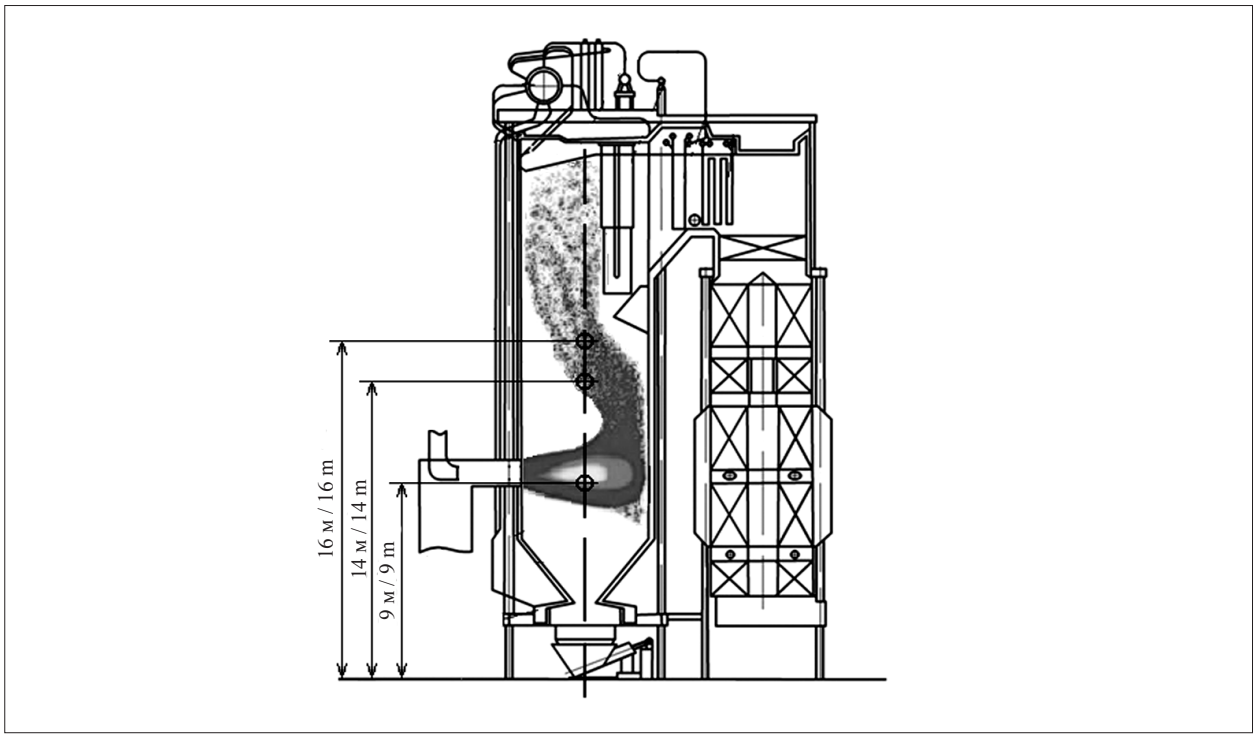


Рис. 3. Схема котла БКЗ-210-140Ф с расположением смотровых лючков
Fig. 3. The scheme of the boiler BKZ-210-140F with the placement of inspection hatches

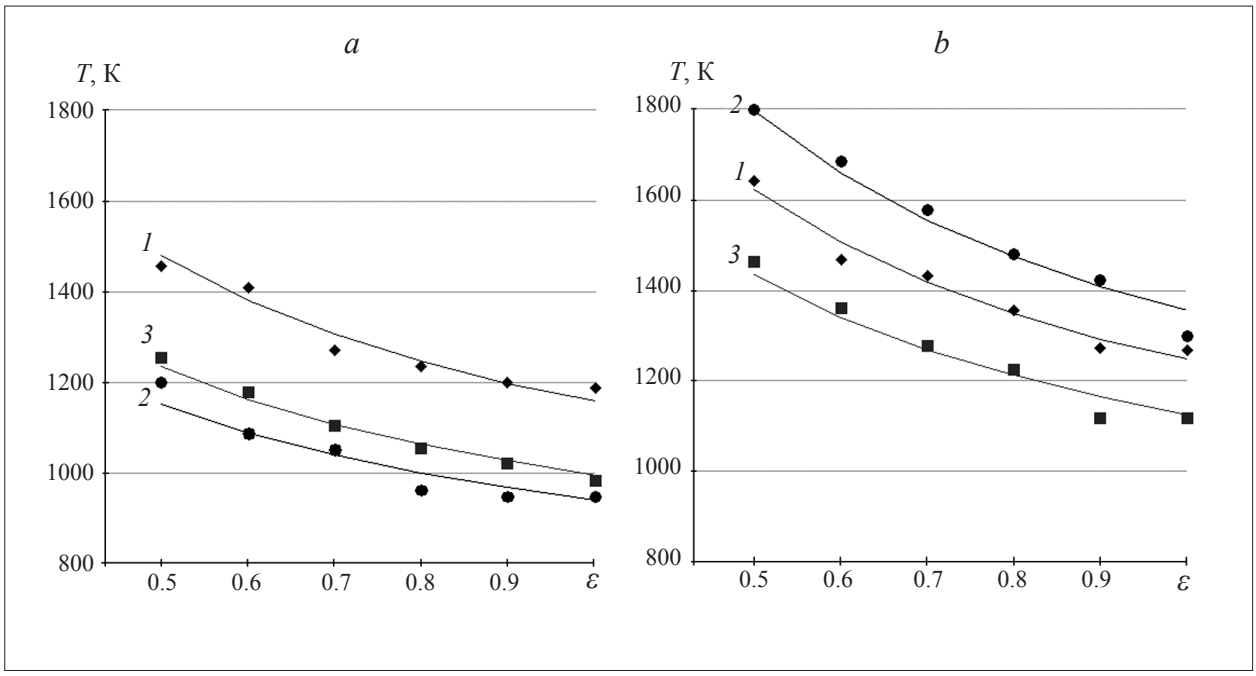


Рис. 4. Значения температур (T, К), измеренных пирометром для торфа (a) и угля (b):
1 – H = 9 м, 2 – H = 14 м, 3 – H = 16 м
Fig. 4. The temperature measurement results (T, K) using the pyrometer for peat (a) and coal (b):
1 – H = 9 m, 2 – H = 14 m, 3 – H = 16 m

Таблица 4 / Table 4

Значения температур (T, К), полученных с помощью функций $T = f(\varepsilon)$ пирометра Optris для торфа и угля / Values of temperatures (T, K) obtained by the pyrometers' functions $T = f(\varepsilon)$ for peat and coal

Топливо / Fuel	H, м H, m	Заданная температура T, К The set temperature T, K			
		873	1073	1273	1473
Торф / Peat	9	1219	1187	**1170**	1161
	14	981	**960**	948	942
	16	1042	**1018**	1005	998
Уголь / Coal	9	1339	1293	**1269**	1257
	14	1463	1410	**1382**	1367
	16	1203	**1165**	1145	1135

Примечание: жирным шрифтом выделены экспериментальные значения температуры, наиболее близкие к заданным (теоретическим).

Note: the values of experimental temperatures that are closest to the set (theoretical) ones are highlighted in bold.

и угля с помощью пирометра Optris (4,24 мкм) в зависимости от установленной на нём ε_λ проводилось на высотах котла $H = 9$ м (на уровне горелок), 14 м и 16 м. Результаты $T = f(\varepsilon)$ представлены на рисунке 4.

С помощью расчётных данных степени черноты ε_λ, полученной по программе «Спектр» (табл. 3), проведена оценка температуры продуктов сгорания. Результаты, полученные с помощью экспериментальных функций $T = f(\varepsilon)$ и расчётных ε_λ, представлены в таблице 4. Предлагаемый подход для определения температуры с помощью пирометра основан на выборе экспериментального значения температуры, наиболее близкого к заданному (теоретическому). В таблице 4 соответствующие значения температуры выделены жирным шрифтом.

Температура газовой фазы в корневой части факела ($H = 9$ м) составила 1170 К при сжигании торфа и 1269 К при сжигании угля, а в хвостовой части ($H = 16$ м) 1018 К и 1165 К соответственно.

Спектральные излучательные способности, полученные расчётным путём (табл. 3), соответствуют значениям температур T, полученным из экспериментальной зависимости $T = f(\varepsilon)$ (рис. 4). А эти экспериментально полученные значения T соответствуют величине концентрации NO_x (рис. 1, см. цв. вкладку VI) на разных высотах H.

На основании рисунка 1 и величины температуры на начальном участке факела (1170 К) при сжигании торфа время образования NO_x составляет менее 0,2 с, что соответствует высоте H около 11 м. На данной высоте завершается образование топливных NO_x в топке котла БКЗ-210-140Ф. Это соответствует корневой части факела при максимальной концентрации NO_x равной 500–600 мг/м^3.

Образование NO_x при сжигании угля происходит на начальном участке факела (1269 К), при горении летучих веществ, выделившихся из частиц топлива. Время образования NO_x составляет менее 0,18 с и соответствует высоте H около 10,8 м. Максимальная концентрация NO_x составляет 650–700 мг/м^3.

Методика данной работы, включающая расчётные исследования по определению спектральной излучательной способности, важна для корректного определения температуры продуктов сгорания для любого котла (парового или водогрейного) при использовании различных топлив. Оперативное измерение пирометрической установкой температурного режима факела котла позволяет добиваться необходимого регламентом уровня выбросов оксидов азота NO_x ($NO + NO_2$).

Заключение

Представленная методика определения температуры с использованием пирометра Optris с рабочей длиной волны 4,24 мкм дала возможность измерить значения температур продуктов сгорания в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа и угля, что позволило провести текущую оценку уровня образования оксидов азота.

Предложенная методика измерения температуры продуктов сгорания позволит поддерживать требуемый уровень экологической безопасности выбрасываемых в атмосферу дымовых газов от предприятий промышленной теплоэнергетики.

Методика измерения температуры продуктов сгорания может быть использована при сжигании различных топлив (газообразных, жидких и твёрдых), что позволит соблю-

дать экологические нормы по атмосферным выбросам для любых котельных агрегатов.

References

1. Roslyakov P.V. Modern air protection technologies at thermal power plants (review) // Thermal Engineering. 2016. V. 63. No. 7. P. 495–510. doi: 10.1134/S0040601516070077

2. Belikov S.E., Kotler V.R. Boilers of thermal power plants and protection of the atmosphere. Moskva: Akva-Term, 2008. 212 p. (in Russian).

3. Kreynin E.V., Mikhalina E.S. Atmosphere pollutant emissions in electric-power industry // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2003. No. 2. P. 22–26 (in Russian).

4. Sheverdjaev O.N., Gvozdev V.M., Pahomov A.V., Majorshina L.I. Methods for reducing nitrogen oxide emissions from pulverized coal boilers // Energosberezhenie i vodopodgotovka. 2010. No. 4 (66). P. 58–63 (in Russian).

5. Belikov S.E. Analysis of the regularities of nitrogen oxides formation in the construction of mathematical models of the fuel combustion process // Energosberezhenie i vodopodgotovka. 2005. No. 5 (37). P. 48–51 (in Russian).

6. Babiy V.I., Kotler V.R., Verbovetskiy E.H. Mechanism of formation and methods of suppression of nitrogen oxides in pulverized coal boilers // Energetik. 1996. No. 6. P. 8–13 (in Russian).

7. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // Official Journal of the European Union. 2010. P. L334/17–L334/119.

8. Kotler V.R., Batorshin V.F. Choice and justification the permissible specific emissions of nitrogen oxides from coal-fired boilers // Elektricheskie stantsii. 2016. No. 12 (1025). P. 27–31 (in Russian).

9. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desyatkov I.A. Research of dispersity and chemical composition of particles in the combustion products at gas-peat mixture burning in the steam boiler BKZ-210-140F // Izvestia Vuzov. Problemy Energetiki. 2016. No. 5–6. P. 55–63 (in Russian).

10. Heat calculations for boilers. Guideline approach / Eds. N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubovsky, E.S. Karasina. Moskva: Ekolit, 2011. 296 p. (in Russian).

11. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Maratkanova E.I., Desiatkov I.A. Investigation of thermal radiation of furnace gases generated from solid-fuel combustion in a steam boiler // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. No. 2. P. 291–294. doi: 10.1134/S0869864319020112

12. Kuzmin V.A., Zagrai I.A. A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. No. 1. Article No. 012226. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012226

13. Klein L., Penzias G.J. Spectral radiances of model rocket exhaust gases at simulated altitude measured with a rapid-scanning spectrometer // AIAA Journal. 1967. V. 5. No. 9. P. 1690–1692.

14. Nelson H.F. Influence of particulates on infrared emission from tactical rocket exhaust // J. Spacecraft and Rockets. 1984. V. 21. No. 5. P. 425–432.

УДК 582.594:581.16(470.13) doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-133-139

Семенная продуктивность и особенности биологии *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) на северной границе ареала

© 2021. И. А. Кириллова, к. б. н., н. с., Д. В. Кириллов, 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: kirillova_orchid@mail.ru, kirdimka@mail.ru

В статье приведены результаты изучения некоторых аспектов репродуктивной биологии *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) на территории Республики Коми, где вид находится на северной границе своего ареала. Выявлено, что *M. monophyllos* образует здесь небольшие ценопопуляции численностью до 100 растений. Эффективность опыления в регионе соответствует средней плодозавязываемости по ареалу. Этот показатель очень варьирует в зависимости от погодно-климатических условий в разные годы в одном фитоценозе. На северной границе ареала существует дополнительное приспособление для максимальной реализации семенного возобновления, основного у этого вида – увеличение числа семян в коробочках. Семенная продуктивность высокая, одна коробочка содержит в среднем 3338±219 семян, причём более 94% – полноценные, реальная семенная продуктивность побега – 53 тыс. семян. Семена очень мелкие – 0,33–0,09 мм, содержат 88,4% пустого воздушного пространства, что обеспечивает им летучесть и увеличивает шанс достигнуть подходящих мест для прорастания.

Ключевые слова: *Malaxis monophyllos* (L.) Sw., Orchidaceae, Республика Коми, северная граница ареала, плодозавязываемость, семенная продуктивность.

Seed productivity and features of biology of *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) on the northern distribution border

© 2021. I. A. Kirillova ORCID: 0000-0001-7774-7709**, D. V. Kirillov** ORCID: 0000-0002-6577-693X**,**
Institute of Biology of the Komi Science Centre
of the Ural Branch the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: kirillova_orchid@mail.ru, kirdimka@mail.ru

The article presents the results of studying some aspects of *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) reproductive biology in the Komi Republic (northeast Russia), where the northern border of this species distribution area passes. The research was carried out in 2010–2019 in the Syktyvdinskiy and Ust'-Kulomskiy administrative districts of the Komi Republic. We have found that *M. monophyllos* usually occurs in wet forests and swamps, and sometimes occupied the disturbed habitats with low competition (old forest motorways). It usually forms small coenopopulations (up to 100 plants), with a high proportion of generative shoots. Within the coenopopulations, individual plants form small groups or grow as single plants. The efficiency of pollination (46%) in the study area corresponds to the average fruit set in the whole species distribution area. This parameter varies highly within one community, depending on the weather and climatic conditions in different years. We found statistically significant negative correlation between fruit setting and the number of seeds in fruit. So, the lower fruit set is compensated by numerous seeds in the fruit. Seed productivity is high. In the Komi Republic, one fruit of *M. monophyllos* contains an average of 3338±219 seeds, with more than 94% of seeds with embryo. The mean index of conditionally-real seed productivity (i. e. the mean number of seeds per a generative shoot) is 53000 psc. In the Komi Republic, the seed productivity of *M. monophyllos* was found to be higher than in the southern parts of its distribution area. It can be assumed that, in the northern part of *M. monophyllos* distribution area, the increased number of seeds in the fruit is one of additional mechanisms of the implementation of seed renewal, which is the main way of reproduction for this species. The seeds of *M. monophyllos* are very small – 0.33–0.09 mm, and contain 88.4% empty air space, which provides them with volatility and increases the chance to reach suitable places for germination.

Keywords: *Malaxis monophyllos* (L.) Sw., Orchidaceae, the Komi Republic, northern distribution border, fruit set, seed productivity.

Семейство Orchidaceae – одно из интереснейших с точки зрения биологии и экологии семейств покрытосеменных растений, но наши знания об орхидных северных территорий до сих пор остаются неполными, особенно это касается некоторых аспектов их репродуктивной биологии. Существует дефицит информации о семенной продуктивности отдельных видов орхидных, что связано со сложностью в подсчёте огромного числа мельчайших пылевидных семян, содержащихся в одной коробочке [1]. Это создаёт дефицит информации о репродуктивном успехе орхидей в разных местообитаниях и в различных частях ареала. Мало данных об опылителях отдельных видов, а для большинства видов орхидных умеренных широт вообще нет никаких сведений об их репродуктивных характеристиках [2].

Объектом нашего исследования стал *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (мякотница однолистная). Вид имеет широкий голарктический ареал, но повсеместно редок. Включён в Красные книги 35 регионов России [3], охраняется во многих европейских странах. Целью нашей работы стало выявление особенностей репродуктивной биологии этого вида в Республике Коми, где до этого подобных исследований не проводилось.

Материалы и методы

Malaxis monophyllos – многолетнее травянистое летнезелёное растение с недолгоживущим корневищем и одним утолщённым междоузлием в основании стебля [4]. В Республике Коми вид редок, включён в региональную Красную книгу, находится здесь на северной границе своего ареала. Встречается в основном на юге региона: в бассейнах рек Уса, Вашка, Вычегда, Локчим, Большая Визинга, Сысола, Луза, Летка и в верхнем течении р. Печора. Размножается семенным путём [5], опыляется грибными комариками [6], которых привлекает неприятный запах цветов, похожий на грибной аромат.

Исследования проводили в 2010–2019 гг. на территории Республики Коми. Обследовано восемь ценопопуляций (ЦП) вида, семь (ЦП 1–7) – в Сыктывдинском районе региона, одна (ЦП 8) – в Усть-Куломском (табл. 1). При их изучении использовали общепринятые в популяционной биологии методики [7]. В августе подсчитывали количество завязавшихся плодов и собирали коробочки со зрелыми семенами из средней части соцветия. Семена просматривали под световым микроскопом МСП-2 с цифровой видеокамерой ТС-500 (увеличение ×4,5). Измерения проводили в программе ToupView. Анализировали среднюю длину и ширину семени и зародыша, отношение этих показателей друг к другу, объём семени и зародыша, долю воздушного пространства в семени [8] у 40–50 выполненных семян из каждой выборки. Для определения качества семян была взята смесь семян из коробочек, отобранных с разных растений в пределах одной ЦП (не менее 600 семян из каждой ЦП), неполноценными считали семена без зародыша. Подсчёт числа семян в коробочках проводили с применением разработанной нами оригинальной методики абсолютного учёта количества семян средствами программного пакета ImageJ 1.5 [9] на сканированном материале в автоматическом режиме (алгоритм Find Maxima) с ручной корректировкой. Для каждой ЦП подсчитаны семена в 5–6 коробочках. В работе использовали следующие показатели: условно-реальная семенная продуктивность, реальная семенная продуктивность и условно-потенциальная семенная продуктивность [2].

Данные обработаны вариационно-статистическими методами с использованием пакета Microsoft Office Excel 2010, статистические расчёты выполнены с помощью среды R (версия 3.3.2). В тексте и таблицах приведены среднее арифметическое ± стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение

Наши исследования показали, что ЦП *M. monophyllos* насчитывают в Республике Коми от 12 до 98 побегов (табл. 1). Такие небольшие ЦП (до 100 растений) характерны для этого вида по всему ареалу [5, 10–12]. Лишь иногда, особенно в нарушенных местообитаниях, вид может образовывать довольно большие скопления [3, 13]. Кроме того, для ЦП *M. monophyllos* характерны значительные колебания численности по годам [4, 11, 12].

Растения в изученных ЦП размещены небольшими группами или единичными растениями, что также свойственно этому виду по всему ареалу [3]. Только в ЦП 4 отмечены довольно крупные скопления растений (до 38 шт.), растения размещены здесь группами вдоль лесной дороги на некотором удалении друг от друга.

В онтогенетической структуре изученных ЦП *M. monophyllos* генеративные побеги

Таблица 1 / Table 1

Характеристика изученных ценопопуляций *Malaxis monophyllos* в Республике Коми
Characteristics of the studied *Malaxis monophyllos* coenopopulations in the Komi Republic

ЦП CP	Местонахождение Location	Координаты Geographical coordinates	Местообитание Habitat	Численность, шт. Number, pcs.
1	Пойма р. Дырнос Floodplain of the Dyrnos river	N61.65635° E50.74411°	Осоково-вахтово-гипновое болото Carex-menyanthes hypnum mire	12
2	Пойма р. Тылаю Floodplain of the Tylayu river	N61.59184° E50.62298°	Вахтово-гипново-сфагновое болото с елью и березой / Menyanthes hypnum-sphagnum mire with birch and spruce	44
3	Пойма р. Сысола Floodplain of the Sysola river	N61.55496° E50.65937°	Хвощово-осоково-сфагновый сосново-берёзовый лес / Equisetum-carex sphagnum pine-birch forest	15
4	Пойма р. Важелью Floodplain of the river Vazhel`yu	N61.64671° E50.67695°	Разнотравный сосновый лес с ольхой по краю дороги / Pine herb forest with alder on the side of the road	98
5	Пойма р. Тылаю Floodplain of the Tylayu river	N61.57357° E50.66132°	Ивово-ольховый разнотравно-моховый лес (тропинка) / Herb-moss willow-alder stand	19–44
6	Окр. с. Лозым Vicinity of Lozym village	N61.45901° E50.52258°	Травяно-зеленомошный ельник, старая дорога / Herb green moss spruce forest, old forest road	58
7	Окр. с. Коччойяг Vicinity of Kochchoyyag village	N61.95452° E50.72273°	Березняк, опушка вдоль лесной дороги Birch forest, edge along the forest road	17
8	Окр. с. Усть-Кулом Vicinity of Ust'-Kulom village	N61.67569° E53.77178°	Разнотравно-зеленомошный сосновый лес с ольхой / Herb green moss pine forest with alder	84

Таблица 2 / Table 2

Морфометрическая характеристика генеративных побегов *Malaxis monophyllos* в Республике Коми
Morphometric parameters of *Malaxis monophyllos* generative individuals in the Komi Republic

ЦП CP	Год Year	Высота растения, см Plant height, cm	Длина соцветия, см Length of inflorescence, cm	Число листьев, шт. Number of leaves, pcs.	Длина листа, см Length of leaf, cm	Ширина листа, см Width of leaf, cm	Число цветков, шт. Number of flowers, pcs.
1	2010	12,37±3,30	4,10±1,54	1,00	4,83±0,77	1,95±0,25	28,75±8,62
2	2016	14,25±4,26	6,66±2,49	1,06±0,24	4,83±1,88	2,25±0,79	26,06±11,20
4	2019	17,55±4,61	8,30±2,74	1,12±0,33	4,91±1,31	2,72±0,73	41,45±16,34
5	2018	17,44±4,25	7,56±2,41	1,00	5,44±1,10	2,50±0,57	30,25±8,68
	2019	15,77±2,51	6,46±1,43	1,00	5,78±1,36	2,19±0,49	28,06±6,67
6	2019	19,81±5,42	9,0±3,34	1,00	5,83±1,21	2,88±0,56	38,56±15,45
8	2011	15,09±4,93	5,73±2,63	1,33±0,49	5,79±1,76	2,76±0,79	34,60±13,29

составляют 32–42% от общей численности популяций, только в ЦП 8 их доля несколько ниже – 16,7%. Похожая онтогенетическая структура ЦП вида отмечена и в других частях его ареала [5, 10].

Наши исследования показали, что средняя высота растений *M. monophyllos* в регионе составляет 16,6±4,7 (от 8 до 28) см. Лист чаще один, 5,3±1,5 см длиной и 2,6±0,7 см шириной. В некоторых ЦП встречаются растения с двумя листьями (9% от всех встреченных растений). Второй лист, если он присутствует, гораздо мельче – 3,8±1,4 см длиной и 1,2±0,5 см шириной. Соцветие 7,3±2,2 см длиной из 34,4±14,2 цветков (от 7 до 75). Размеры растений из разных ЦП региона приведены в таблице 2. Высота растений варьирует от 12,4 до 19,8 см, число цветков – от 26 до 42. Для Польши приведены несколько большие размеры растений этого вида: высота – 16,6–26 см, число цветков – 34–45 шт. [14].

В болотных ЦП (ЦП 1 и 2) растения несколько мельче, чем в лесных ЦП (табл. 2).

Средний показатель плодозавязываемости *M. monophyllos* в регионе составил 46%. Считается, что *M. monophyllos*, как и другие виды этого рода, является строго перекрёстноопыляемым видом, поэтому плодообразование его полностью зависит от наличия и активности опылителей. Для данного вида по всему ареалу характерен низкий и умеренный показатель эффективности опыления (1,5–55%) [4–6, 10, 14], что сопоставимо с другими аллогамными видами орхидных [15]. Основным опылителем *M. monophyllos* являются грибные комарики семейства Mycetophylidae [6]. Они обычно встречаются во влажных местах обитания, в основном в лесистых районах, а личинки большинства видов являются мицетофагами, питаясь плодовыми телами гриба или мицелием в мёртвой древесине.

Некоторыми исследователями [3] отмечено, что процент завязывания плодов этого вида в значительной степени варьирует в зависимости от погодно-климатических условий в разные годы в одном фитоценозе. Нами также отмечена подобная картина (рис.). Например, в ЦП 2 и 5 эффективность опыления изменялась в зависимости от года исследования в 5–6 раз.

Коробочка *M. monophyllos*, 5,83±0,89 мм длиной и 2,32±0,36 мм шириной, содержит множество мельчайших пылевидных желтоватых семян. Семя состоит из оболочки и недифференцированного зародыша. В регионе средняя длина семени *M. monophyllos* составляет 0,33±0,05 мм, ширина – 0,09±0,02 мм. Для Европы приведены меньшие размеры семян этого вида – (0,10–0,15)×0,05 мм [16]. Зародыш семени в регионе – 0,09×0,05 мм. Объём семени – $1{,}11 \cdot 10^{-3}$ мм^3, объём зародыша – $1{,}28 \cdot 10^{-3}$ мм^3. Доля пустого воздушного пространства в семени составляет в среднем 88,4%. Морфометрическая характеристика семян *M. monophyllos* в разных ЦП региона приведена в таблице 3. Наименьший объём семени отмечен в ЦП 7, 1 и 2, расположенных в лиственном лесу и на болотах.

В Республике Коми в одной коробочке *M. monophyllos* содержится в среднем 3338±219 семян (минимально – 1668, максимально – 6961 шт.). Это почти в два раза больше, чем в других частях ареала вида, для которых приводится около 1500 семян [1, 4, 17, 10]. Число семян в коробочке варьирует в изученных нами ЦП от 2807 до 3830 шт. (табл. 4). Часть

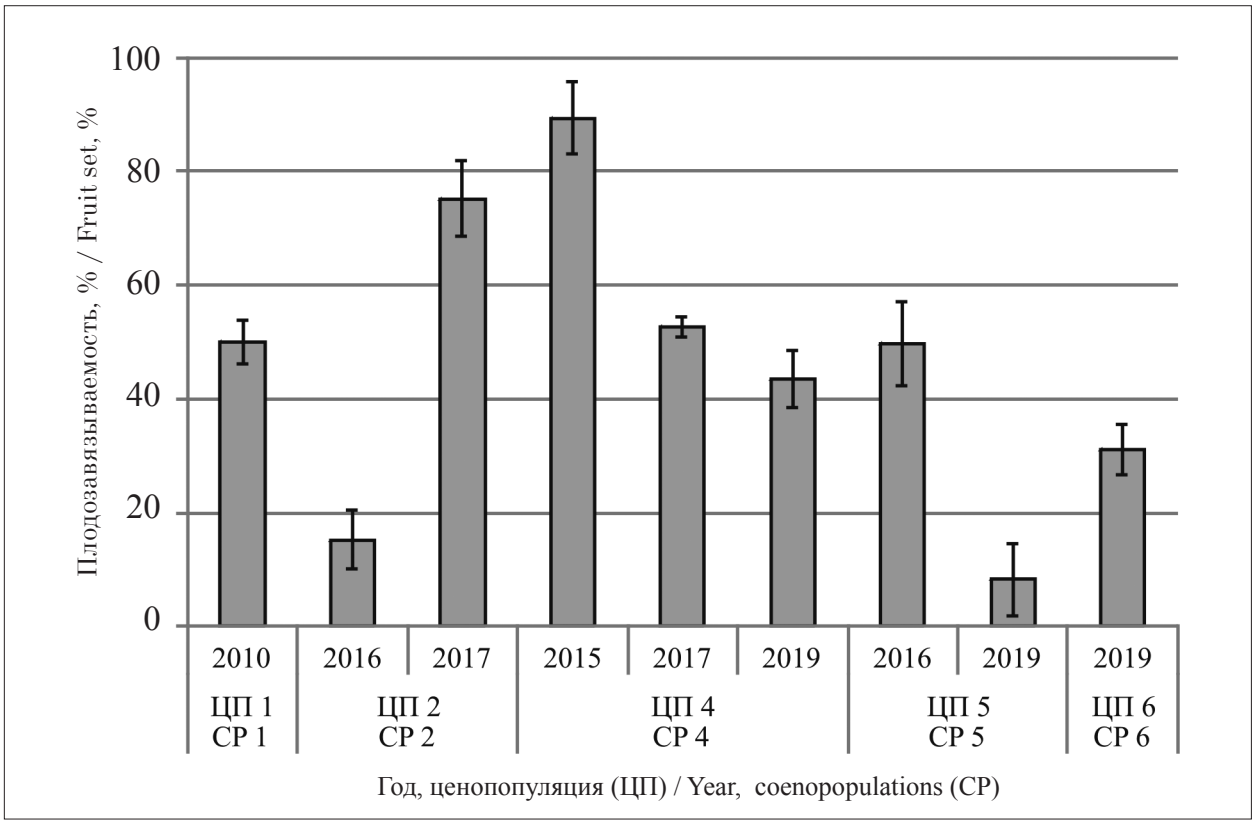


Рис. Плодозавязываемость *Malaxis monophyllos* в Республике Коми
Fig. Fruit set of *Malaxis monophyllos* in the Komi Republic

Таблица 3 / Table 3

Морфометрическая характеристика семян / Morphometric characteristics of seeds

ЦП CP	Год Year	Семя / Seed				SWE, %
		длина, мм length, mm	ширина, мм width, mm	индекс index	объём, мм^3×10^{-3} volume, mm^3×10^{-3}	
1	2010	0,32±0,05	0,11±0,02	3,06±0,55	0,94	1,8
2	2017	0,33±0,05	0,10±0,02	3,23±0,74	0,93	6,3
3	2010	0,30±0,03	0,11±0,02	2,64±0,43	1,02	0,9
4	2015	0,32±0,03	0,11±0,02	2,87±0,50	1,12	6,2
	2017	0,34±0,06	0,11±0,02	3,06±0,61	1,13	0,7
	2019	0,35±0,05	0,13±0,02	2,70±0,49	1,91	3,0
5	2016	0,29±0,04	0,12±0,02	2,41±0,51	1,11	7,8
	2019	0,31±0,05	0,12±0,02	2,64±0,53	1,11	18,6
6	2019	0,35±0,04	0,13±0,02	2,83±0,54	1,43	9,3
7	2015	0,35±0,05	0,09±0,01	4,09±0,89	0,70	–
ЦП CP	Год Year	Зародыш / Embryo				AS, %
		длина, мм length, mm	ширина, мм width, mm	индекс index	объём, мм^3×10^{-3} volume, mm^3×10^{-3}	
1	2010	0,09±0,01	0,05±0,01	1,89±0,35	0,12	87,1
2	2017	0,10±0,01	0,05±0,01	1,97±0,36	0,15	83,5
3	2010	0,09±0,01	0,05±0,01	1,62±0,23	0,14	86,5
4	2015	0,09±0,01	0,05±0,01	1,82±0,30	0,11	90,5
	2017	0,11±0,02	0,06±0,01	1,93±0,41	0,18	84,1
	2019	0,10±0,01	0,05±0,01	1,91±0,36	0,15	91,1
5	2016	0,10±0,01	0,06±0,01	1,64±0,25	0,17	84,5
	2019	0,08±0,01	0,04±0,01	2,06±0,34	0,07	93,8
6	2019	0,09±0,01	0,05±0,01	1,89±0,32	0,12	91,7
7	2015	0,09±0,01	0,05±0,01	1,91±0,31	0,10	85,1

Примечание: SW – доля семян без зародыша; AS – доля пустого воздушного пространства в семени; «–» – отсутствие данных.

Note: SW – the percentage of seeds without embryo; AS – portion of empty air space in the see; "–" – lack of data.

Таблица 4 / Table 4

Семенная продуктивность *Malaxis monophyllos* в Республике Коми
Seed productivity of *Malaxis monophyllos* in the Komi Republic

Признак / Parameters		ЦП 1 CP 1	ЦП 2 CP 2	ЦП 4 CP 4		ЦП 6 CP 6
		2010 г.	2017 г.	2017 г.	2019 г.	2019 г.
Число семян в плоде, шт. Number of seeds in fruit, pcs.	среднее average	2807±364	3830±564	2997±181	3502±472	3828±687
	min	1668	2500	2447	1907	2147
	max	3679	5813	3692	4813	6961
Реальная семенная продуктивность плода, шт. Real seed productivity of fruit, pcs.		2756	3589	2976	3397	3472
Условно-потенциальная семенная продуктивность побега, шт. / Conditionally potential seed productivity of individual, pcs.		80701	99810	99650	145158	147608
Условно-реальная семенная продуктивность побега, шт. / Conditionally real seed productivity of individual, pcs.		40351	75057	52416	63144	45906
Реальная семенная продуктивность побега, шт. / Real seed productivity of individual, pcs.		39624	70328	52049	61249	41637

семян в коробочках (0,7–18,6%) – неполноценная (табл. 3). Максимальное количество неполноценных семян отмечено в ЦП 5 в 2019 г., когда зафиксирована и самая низкая эффективность опыления (8,3%). Надо отметить, что вегетационный период 2019 г. был самым холодным и сырым из всех лет наблюдений (сумма активных температур (> 10 °С) составила всего 945°).

Обнаружена отрицательная статистически достоверная корреляция (r = 0,9) между плодозавязываемостью и числом семян в коробочке, то есть более низкое плодоношение компенсируется большим количеством семян в коробочках. Видимо, включаются компенсаторные механизмы, и ресурсы растения идут на поддержание или большего количества плодов или семян. Компромисс между количеством плодов и числом семян можно считать адаптивной стратегией в условиях ограниченности ресурсов (или опылителей).

Реальная семенная продуктивность коробочки *M. monophyllos* в регионе составила 3238 шт. Условно-потенциальная семенная продуктивность побега (средняя семенная продуктивность в случае 100% опыления семян) – 114585 семян. В Мурманской области этот показатель ниже – 39550 шт. [2]. Условно-реальная семенная продуктивность побега варьирует в изученных ЦП *M. monophyllos* от 40 тыс. до 75 тыс. семян на одну особь (табл. 4). В Приморском крае на одно растение приходится в среднем 11782 семени [3], в Европе – 19490 шт. [1]. Реальная семенная продуктивность побега составила в Республике Коми 52978 семян. Этот же показатель для вида в Тверской области гораздо ниже – 9847 шт. [17].

Таким образом, на территории Республики Коми семенная продуктивность вида оказалась выше, чем в более южных частях ареала. Можно предположить, что на северной границе ареала, где существуют ограничения в репродуктивном процессе, у *M. monophyllos* появляются дополнительные механизмы для реализации семенного возобновления – увеличение числа семян в коробочке. Вероятно, это общая стратегия Орхидных для компенсации проблем с семенным возобновлением. Так, увеличение числа семян в коробочке отмечено у безнектарных видов орхидей для компенсации более низкой эффективности опыления по сравнению с нектароносными Орхидными [18], у некоторых тропических орхидей, характеризующихся очень низкой плодозавязываемостью [15], а также зафиксировано для нектароносной *Platanthera bifolia* [9] и безнектарной *Dactylorhiza cruenta* на северной границе ареала (по неопубликованным данным автора статьи И.А. Кирилловой).

Семена *M. monophyllos* созревают во вторую половину лета и с наступлением сырой погоды сразу прорастают, часто это происходит в толще отмерших оснований листьев у генеративных растений [3]. Развитие проростков этого вида отличается от орхидных других жизненных форм. Семена могут быстро прорастать на поверхности почвы, протокорм вскоре зеленеет и роль микоторофности в его жизни снижается [19]. Образуются плотные группы разновозрастных особей [3]. Поскольку вегетативное размножение не играет роли в поддержании ЦП *M. monophyllos* [4], то распространение *M. monophyllos* определяется в основном условиями, необходимыми для развития его проростков и ювенильных растений. Основным фактором, ограничивающим распространение этого вида, является постоянство влажности (отсутствие пересыхания) и физические свойства поверхностного слоя субстрата [19].

Заключение

M. monophyllos в Республике Коми встречается во влажных лесных сообществах и на болотах, иногда занимает нарушенные местообитания с пониженной конкуренцией (старые лесные дороги). Образует небольшие ЦП (до 100 растений), с высокой долей генеративных побегов. Эффективность опыления в регионе соответствует среднему показателю плодозавязываемости вида по ареалу. Семенная продуктивность высокая, одна коробочка содержит в среднем 3338 семян, причем более 94% – полноценные, реальная семенная продуктивность побега 53 тыс. семян.

Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А19-119011790022-1.

References

1. Arditti J., Ghani A.K.A. Numerical and physical properties of orchid seeds and their biological implications // New Phytologist. 2000. V. 145. P. 367–421.

2. Blinova I.V. The estimation of reproductive success of orchid species north of the Arctic Circle in Europe // Vestnik TvGU. Seriya biologiya i ekologiya. 2009. No. 12. P. 76–83 (in Russian).

3. Vakhrameeva M.G., Varlygina T.I., Tatarenko I.V. Orchids of Russia: Biology, Ecology and Protection. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. 437 p. (in Russian).

4. Tatarenko I.V. Orchids of Russia: life forms, biology, strategy of preservation. Moskva: Argus, 1996. 207 p. (in Russian).

5. Vakhrameeva M.G. *Malaxis monophyllos* (L.) Swarta // Biologicheskaya flora Moskovskoy oblasti. Moskva: Izd-vo Mosk. un-ta, 1993. V. 9. No. 1. P. 40–50 (in Russian).

6. Claessens J., Kleynen J. The flower of the European orchid: form and function. Netherlands: Voerendaal, 2011. 439 p.

7. Zlobin Yu.A., Sklyar V.G., Klimenko A.A. The populations of rare species of plants: the theoretical foundations and methodology of the study. Sumy: Universitetskaya kniga, 2013. 439 p. (in Russian).

8. Arditti J., Michaud J.D., Healey P.L. Morphometry of orchid seeds. 1. Paphiopedilum and native California and related species of Calypso, Cephalanthera, Corallorhiza and Epipactis // American Journal of Botany. 1979. V. 66. No. 10. P. 1128–1137. doi: 10.1002/j.1537-2197.1979.tb06332.x

9. Kirillova I.A., Kirillov D.V. Reproductive biology of *Platanthera bifolia* (L.) Rich. (Orchidaceae) on its northern distribution border (The Komi Republic) // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2017. No. 38. P. 68–88 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/38/4

10. Blinova I.V. *Malaxis monophyllos* (Orchidaceae) in the flora of Murmansk region // Botanicheskiy zhurnal. 2013. V. 98. No. 10. P. 1303–1314 (in Russian).

11. Khapugin A.A., Silaeva T.B., Semchuk A.A., Kunaeva E.N. Populations of *Orchis militaris, Epipactis palustris* and *Malaxis monophyllos* in the Republic of Mordovia (Central Russia) // Biodiversity Research and Conservation. 2016. V. 42. No. 1. P. 33–40. doi: 10.1515/biorc-2016-0012

12. Jermakowicz E., Brzosko E. Demographic responses of boreal-montane orchid *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. populations to contrasting environmental conditions // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 2016. V. 85. No. 1. P. 1–17. doi: 10.5586/asbp.3488

13. Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Lukina N.V., Rakov E.A. *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. in industrial dumps and natural habitats in the Middle Urals // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2018. V. 8. No. 177. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.15393/uchz.art.2018.258

14. Jermakowicz E., Ostrowiecka B., Tałałaj I., Pliszko A., Kostro-Ambroziak A. Male and female reproductive success in natural and anthropogenic populations of *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) // Biodiversity Research and Conservation. 2015. V. 39. No. 1. P. 37–44. doi: 10.1515/biorc-2015-0024

15. Neiland M.R.M., Wilcock C.C. Fruit set, nectar reward, and rarity in the Orchidaceae // American Journal of Botany. 1998. V. 85. No. 12. P. 1657–1671. doi: 10.2307/2446499

16. Bojňanský V., Fargašová A. Atlas of seeds and fruits of Central and East-European Flora: The Carpathian Mountains Region. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007. 1046 p.

17. Khomutovskiy M.I. Antecology, seed productivity and assessment of the state of coenopopulations of some species of orchid (Orchidaceae Juss.) Valdai Upland: Avtoref. diss. kand. biol. nauk. Moskva: GBS RAN, 2012. 23 p. (in Russian).

18. Sonkoly J.E., Vojtkó A., Török P., Illyés Z., Sramkó G., Tökölyi J., Molnár V.A. Higher seed number compensates for lower fruit-set of deceptive orchids // Journal of Ecology. 2015. V. 104. No. 2. P. 343–351. doi: 10.1111/1365-2745.12511

19. Vinogradova T.N. Early stages of *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. ontogeny in nature // Byulleten GBS. 1999. V. 178. P. 106–112 (in Russian).

УДК 502.753 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-140-146

Опыт пересадки популяции краснокнижного вида растения в условиях начала реконструкционных работ в охранной зоне нефтепровода

© 2021. Т. А. Трифонова[1, 2], д. б. н., профессор, А. А. Марцев[2], к. б. н., доцент, О. Г. Селиванов[2], инженер-исследователь, О. В. Савельев[2], к. б. н., доцент,
[1]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1,
[2]Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,
e-mail: MartsevAA@yandex.ru

В статье освещается опыт пересадки ветреницы дубравной (*Anemone nemorosa* L.), занесённой в Красную книгу Владимирской области как редкий вид (категория статуса – 3). Особенностью данной работы является пересадка *A. nemorosa* в осенний период в связи с началом проведения на месте естественного произрастания данного вида реконструкционных работ в охранной зоне нефтепровода. Для дальнейшего сохранения аборигенной популяции *A. nemorosa* в природных условиях было выбрано новое место пересадки, сходное по экологическим и фитоценотическим условиям с местом естественного произрастания и не попадающее в зону строительных реконструкционных мероприятий. В статье приводятся данные геоботанического описания исходного и реципиентного местообитаний *A. nemorosa*, представлены результаты химического анализа почв, проведена оценка жизненности пересаженных растений, поэтапно описана методика пересадки данного вида растения. Проведённые в течение двух последующих лет весенние фенологические наблюдения показали, что *A. nemorosa* успешно перенесла осеннюю пересадку и адаптировалась к новому месту. Мониторинговые исследования подтвердили устойчивость образованной искусственной популяции *A. nemorosa*, что является важным фактором для самовозобновления популяции, сохранения биологического разнообразия редких и исчезающих растений, целостности экосистемы данной территории.

Ключевые слова: *Anemone nemorosa*, антропогенная трансформация, нефтепровод, редкие и исчезающие виды, транслокация.

Experience of transplanting a population of a red book plant species in the conditions of the beginning of reconstruction works in the protected area of the oil pipeline

© 2021. T. A. Trifonova[1, 2] ORCID: 0000-0002-1628-9430, A. A. Martsev[2] ORCID: 0000-0002-3572-9163, O. G. Selivanov[2] ORCID: 0000-0003-3674-0660, O. V. Saveliev[2] ORCID: 0000-0002-3425-8021,
[1]Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskiye Gory, Moscow, Russia, 119991,
[2]Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov,
87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,
e-mail: MartsevAA@yandex.ru

The article highlights the experience of transplanting *Anemone nemorosa* L. listed in the Red Book of Vladimir Region as a rare species (status category 3). A special feature of this work is the transplantation of *A. nemorosa* in the autumn period, in connection with the beginning of the reconstruction works in the protected zone of the oil pipeline at the place of *A. nemorosa* natural growth. To further preserve the native population of *A. nemorosa* in natural conditions, a new transplant site was chosen which is close in ecological and phytocenotic conditions to the place of natural growth and does not fall into the zone of reconstruction works. The work was coordinated with the relevant state environmental organizations. The article provides data on the geobotanical description of the source and recipient habitats of *A. nemorosa*, presents the results of chemical analysis of soils, assesses the viability of transplanted plants, and describes step-by-step the method of transplanting this type of plant. Over the next two years, spring phenological observations showed

that *A. nemorosa* successfully underwent an autumn transplant and adapted to a new location. Monitoring studies have confirmed the stability of the formed artificial population of *A. nemorosa*, which is an important factor for self-renewal of the population, conservation of the biological diversity of rare and endangered plants, and the integrity of the ecosystem of this territory. The developed technique for transplanting *Anemone nemorosa* in late autumn allows, in some cases, to push the time limits for translocation of rare and endangered plant species, and to preserve valuable populations in the cases of a real anthropogenic impact.

Keywords: *Anemone nemorosa*, anthropogenic transformation, oil pipeline, rare and endangered species, translocation.

Прокладка и эксплуатация нефтепроводов неизбежно связана с воздействием на природные биотопы [1]. В связи с интенсификацией антропогенного воздействия на природные экосистемы, сохранение биоразнообразия является острой проблемой современной науки [2–4]. Растения являются неотъемлемым фактором существования человека, так как создают необходимую для него среду обитания и обеспечивают большинство биологических и социальных потребностей, поэтому, наряду с другими компонентами живой природы, рассматриваются как национальное богатство, требующее сохранения, обогащения и рационального использования. Первоочерёдное внимание в этом отношении заслуживают наиболее уязвимые растения – редкие виды дикорастущей флоры [5].

В соответствии с Федеральным законом № 7 «Об охране окружающей среды» в целях сохранения видового разнообразия флоры осуществляются мероприятия по сохранению биоразнообразия, и, прежде всего, видов, занесённых в региональные Красные книги, разрабатываются различные методы наблюдения, сохранения, пересадки и реабилитации особо охраняемых видов растений [6–9]. Среди наиболее эффективных стратегий по сохранению генофонда растений можно выделить создание банков генетического материала (криоконсервация семян), а также интродукцию растений с последующим их культивированием в условиях *ex situ* (в ботанических садах и дендропарках) [10]. Однако данные методы являются достаточно экономически затратными.

Приоритетная роль при сохранении растений, занесённых в Красную книгу региона, отводится методу пересадки растений, который позволяет сохранить объект минимально нарушенным, в естественной для него среде обитания, поскольку только в этом случае возможно полноценное и долговременное сохранение видов и продолжение их естественной эволюции [6]. При этом осуществляется перенос растений из природных мест произрастания, которые в перспективе будут антропогенно преобразованы (застройка, вырубка леса, разведка полезных ископаемых и др.), в места, схожие по экологическим факторам и только после соответствующего научного обоснования, так как разработка мероприятий по сохранению биологического разнообразия редких и исчезающих видов растений аборигенной флоры должна основываться на знании эколого-биологических и репродуктивных особенностей видов, которые в конечном счёте определяют сохранение и возобновление популяций [11, 12]. Такая работа достаточно трудоёмка, приживаемость порой проблематична и зависит от множества факторов. Получить устойчивую самовозобновляющуюся популяцию с сохранением природного богатства генофонда возможно при достаточном числе пересаживаемых экземпляров. Однако, такие работы оправданы в случае потенциальной гибели природной популяции редких охраняемых видов [1, 10].

Цель настоящей работы состояла в сохранении популяции *Anemone nemorosa* L. путём её пересадки с территории, отведённой под проведение реконструкционных работ в охранной зоне нефтепровода. Новизна работы заключается в апробации способа пересадки ветреницы дубравной поздней осенью, в связи с началом реконструкционных работ.

Материалы и методы исследования

Объект настоящего исследования – *Anemone nemorosa*, многолетнее травянистое растение семейства лютиковые (Ranunculaceae), высотой от 8 до 25 см, с мясистым корневищем и одиночным длинночерешковым прикорневым листом. Корневище ветвится и быстро разрастается, обеспечивая образование густых зарослей. Весенний эфемероид, цветёт в апреле-мае, плоды созревают в июне [13]. Требователен к влаге и часто предпочитает сыроватые местообитания, но при этом весьма светолюбив и хорошо растёт при полном солнечном освещении. Семенная продуктивность довольно высокая, однако полевая всхожесть семян низкая [14], а сеянцам необходимо много времени, чтобы набрать силу и зацвести (10 лет и более), поэтому основным способом размножения растения всё-таки служит веге-

тативный. Хорошо развивается на умеренно кислых почвах (при pH 4,5–6,0 ед.), даже при неблагоприятных условиях окружающей среды способна увеличивать численность в несколько раз.

В естественных условиях ветреница дубравная встречается в смешанных лесах европейской части России и Западной Европы, а также в Средиземноморье. Главной причиной сокращения численности её популяций является активная хозяйственная деятельность человека, связанная с вырубкой лесов, массовым сбором цветущих растений населением, выкапыванием корневищ для пересадки в культуру, активным сбором растения для лекарственных целей [15–17]. В естественных местах обитания *A. nemorosa* оказалась под угрозой исчезновения. В связи с этим, во многих странах мира, в том числе и в России, данный вид растения имеет природоохранный статус. Во Владимирской области ветреница дубравная внесена в Красную книгу как редкий вид (категория статуса – 3). Достоверно известны местонахождения её в Гусь-Хрустальном, Меленковском, Петушинском, Собинском и Юрьев-Польском районах области [18].

Участок места произрастания естественной популяции *A. nemorosa,* который попал в зону реконструкционных работ, расположен в Гусь-Хрустальном районе Владимирской области. Данный район находится в северо-восточной части Мещерской низменности и характеризуется высокой заболоченностью и лесистостью (преимущественно хвойные и смешанные леса). Климат умеренно-континентальный. Почвы дерново-подзолистые супесчаные [19].

По данным литературных источников, *A. nemorosa* относится к видам, высоко устойчивым к интродукции в культуру [20, 21], а также к реинтродукции в природу [22], поэтому с целью сохранения аборигенной популяции было принято решение о её пересадке за границу зоны строительных работ.

Методический подход к осуществлению работ по пересадке основывался на разработках Л.П. Капелькиной [6] и рекомендациях Ботанического сада Нижегородского университета им. Лобачевского. Мероприятия по пересадке растений состояли из нескольких этапов, осуществление которых было обусловлено началом работ по реконструкции нефтепровода осенью 2018 г. и включали следующий алгоритм действий.

1. Получение разрешения на проведение работ по пересадке популяции растения со стороны единой дирекции особо охраняемых территорий Владимирской области, а также Гусевского лесничества Владимирской области.

2. Проведение инженерно-экологических изысканий в зоне реконструкционных работ, а также подбор места для пересадки краснокнижного растения (весна 2018 г.). Место для пересадки было подобрано за пределами проведения реконструкционных работ и соответствовало экологическим и фитоценотическим условиям (наличие необходимого затенения, отсутствие застойного увлажнения, а также иссушения).

3. Собственно, проведение работ по пересадке растений (осень 2018 г.).

Геоботанические исследования фитоценозов участков естественного произрастания и пересадки *A. nemorosa* были выполнены с использованием метода геоботанического описания в пределах их естественных границ.

Отбор проб почв производили методом конверта (ГОСТ 17.4.4.02-84) с глубины 10–15 см. Определение ионного состава водных вытяжек почв с участка исходного местообитания и участка пересадки *A. nemorosa* проводили методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-104» (ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10 и ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.74-2012). Брали 5 г воздушно-сухой почвы, добавляли 25 мл дистиллированной воды и в течение 30 мин перемешивали. Далее центрифугировали в течение 5 мин со скоростью вращения 5000 об./мин и отбирали надосадочную жидкость для анализа. Определение pH водной вытяжки почв проводили с помощью анализатора жидкости «Эксперт-001-3» потенциометрическим методом.

С учётом специфики времени транслокационных работ (пониженная температура окружающего воздуха, низкая освещённость, пониженная температура грунта, повышенная влажность почвы и т. д.), а также морфологических особенностей растения, для пересадки популяции ветреницы дубравной нами была использована следующая технология пересадки:

1. Подготовка участка для пересадки, включающая расчистку от сухостоя и снятие верхнего слоя почвы на глубину 20 см.

2. Снятие и перенос верхнего слоя почвы, содержащего вегетативные органы *A. nemorosa* с участка, попадающего в зону реконструкции на реципиентный участок. Снятие верхнего слоя почвы производилось небольшими квадратами размером 25 × 25 см,

при этом высота почвенного слоя составляла 20 см. Корневище *A. nemorosa* расположено горизонтально в верхнем ярусе подстилки или в почве у самой поверхности, поэтому, во избежание его повреждения при выкапывании и переноске, брались целостные фрагменты грунта, без разрушения почвенного слоя. Сохранение расположения корневища растения в верхней части почвы или под подстилкой, за счёт того, что почвенный слой не был нарушен, позволяет *A. nemorosa* на новом месте легче адаптироваться и переносить возможные заморозки при осенней пересадке, способные повлиять на выживаемость и дальнейший рост растения [23].

3. Укладка верхнего слоя почвы, содержащего вегетативные органы *A. nemorosa*, на подготовленный участок по «принципу газона» плотно друг к другу. При проведении данного этапа почва не проливалась водой, не мульчировалась какими-либо удобрениями. При укладке по «принципу газона» все неплотности между фрагментами грунта с растениями просыпались почвой с данного участка.

Во избежание пересушивания и возможного переохлаждения снятого верхнего слоя почвы все вышеперечисленные этапы производили в течение одного дня.

Мониторинговые мероприятия осуществляли весной 2019, 2020 гг.

Результаты и обсуждение

Изъятие ветреницы дубравной производили в смешанном лесу, древостой которого сформирован в основном берёзой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и ольхой чёрной (*Alnus glutinosa* L.) с диаметром ствола в среднем 25 см и высотой 18–24 м. Сомкнутость крон древесного полога составляет 0,7, в составе единично представлены осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) диаметром до 35–40 см. Подрост редкий, высотой 1–4 м, его образуют ель обыкновенная (*Picea abies* L.) и осина (*Populus tremula* L.), подрост последней на опушках образует куртины средней густоты. Подлесок густой, высотой 1,3–4 м, в нём преобладает рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), также отмечены черёмуха обыкновенная (*Padus avium* L.), крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), смородина чёрная (*Ribes nigrum* L.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), ива пепельная (*Salix cinerea* L.) и ива ушастая (*Salix aurita* L.). Травяно-кустарничковый ярус имеет значительное общее проективное покрытие (ОПП) – 70–90%, в нём преобладают звездчатка лесная (*Stellaria holostea* L.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), фиалка болотная (*Viola palustris* L.), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), живучка ползучая (*Ajuga reptans* L.), гравилат речной (*Geum rivale* L.), лютик едкий (*Ranunculus acris* L.), щитовник картузианский (*Dryopteris carthusiana* Vill), щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas* L.), буквица лекарственная (*Betonica officinalis* L.), чина весенняя (*Lathyrus vernus* L.), отмечены также чистец болотный (*Stachys palustris* L.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* L.), чистяк весенний (*Ficaria verna* Huds.), марьянник дубравный (*Melampyrum nemorosum* L.). Моховой покров развит слабо, представлен подушками и куртинными разрастаниями зелёных мхов, ОПП – 40%.

Местообитание, выбранное в качестве реципиентного для пересадки популяции ветреницы дубравной, было подобрано, исходя из сходства видового состава фитоценоза, а также почвенно-гидрологических условий. Оно расположено на удалении около 2 км от исходного и имело свои характерные признаки. Древостой сформирован в основном берёзой пушистой (*Betula pubescens*) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) диаметром в среднем 20–30 см и высотой до 20 м и единично представлены ель обыкновенная (*Picea abies*) диаметром около 15–20 см, сомкнутость древостоя 0,6 и возрастом не менее 40 лет. Подрост редкий, высотой 1–2 м, его образуют ель обыкновенная возрастом не менее 10–15 лет. Подлесок густой, высотой 1–4 м, в нём преобладает крушина ломкая (*Frangula alnus*), черёмуха обыкновенная (*Padus avium*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus*). Травяно-кустарничковый ярус имеет значительное ОПП – 70–90%. В нём присутствуют популяции ветреницы дубравной (*Anemone nemorosa*), кислицы обыкновенной (*Oxalis acetosella*), отмечены также майник двулистный (*Maianthemum bifolium* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca*), ожика волосистая (*Luzula pilosa* L.), звездчатка лесная (*Stellaria holostea*), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*), фиалка болотная (*Viola palustris*), дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.), буквица лекарственная (*Betonica officinalis*), живучка ползучая (*Ajuga reptans*), осо-

ка весенняя (*Carex caryophyllea* Latourr.) и сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*). Моховой покров развит слабо, представлен подушками и куртинными разрастаниями зелёных мхов, ОПП составляет 40%.

В целом, новое местообитание можно охарактеризовать как более дренированное, что явилось положительным фактором, поскольку снижало возможную конкуренцию со стороны влажно- и высокотравных видов (*Urtica dioica*, *Filipendula ulmaria*) и негативное влияние сезонного переувлажнения (вымокания). Древостой более локально разрежен, по сравнению с исходным местом произрастания, что также является существенным фактором, поскольку ветреница дубравная проявляет повышенные требования к освещённости. По фитоценотическим характеристикам оба участка практически схожи.

Известно, что химический состав почвы оказывает влияние на вегетативные и регенеративные показатели травянистых лесных подлесковых растений. Вегетативные показатели снижаются в почве кислых участков и имеют значительно лучшие показатели на умеренно-кислых и нейтральных участках [24, 25], поэтому в задачу исследования входило определение как ионного состава, так и кислотности почвы подобранного участка для пересадки растения и с места естественного произрастания. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, pH водной вытяжки почвы с места пересадки соответствует слабокислой почвенной среде, что для роста и развития *A. nemorosa*, несомненно, является благоприятным фактором. Водорастворимые соединения в почве, которые являются источником ионов, играют также важную роль в жизнедеятельности травянистых растений. Так, например, сульфат аммония и сульфат магния способствуют более лучшему прорастанию семян. Хлориды в виде солей кальция и магния активно участвуют в обменных процессах в организме растений, а их повышенная концентрация может привести к преждевременному усыханию. Ионы кальция и магния способствуют активизации физиологических процессов, протекающих в растениях [26]. Отмечено, что видовое распределение сосудистых растений тесно связано как с pH почвенного раствора, и с содержанием в нём ионов K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} [27]. Превышение концентраций, наличие или отсутствие какого-либо водорастворимого катиона или аниона в почвенном растворе может существенно повлиять на развитие и жизнеспособность растений. Результаты исследований, приведённые в таблице 1, показывают, что ионный состав водных вытяжек почв с места естественного произрастания и места пересадки *A. nemorosa* имеют несущественные различия. Так, содержание ионов K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} в почвенном растворе с обоих мест имеет близкие показатели. Необходимо отметить, что содержание фосфат-ионов в месте пересадки *A. nemorosa* значительно ниже, чем в месте естественного произрастания – в 3 раза, но в данном случае это может быть положительным фактором, так как известно, что повышенное содержание PO_4^{3-} стимулирует интенсивное развитие растительности и может оказывать определённое воздействие на развитие конкурентных отношений в растительной среде, что в перспективе может привести к снижению популяций флористически разнообразных и редких лесных видов растений [28].

В начале мая 2019 г. на месте пересадки *A. nemorosa* нами были обнаружены вегетативные побеги растения, при этом за пределами участка посадки их обнаружено не было. В связи с ранней весной в Европейской части России в 2019 г., растение на этот период практически закончило цветение и были обнаружены плоды.

Таблица 1 / Table 1

Ионный состав и pH водной вытяжки почв с места естественного произрастания и места посадки *Anemone nemorosa* / Ionic composition and pH of water extraction of soils from the place of natural growth and planting of *Anemone nemorosa*

Образец почвенной пробы Soil sample	pH, ед. units	Содержание ионов, мг/кг почвы Content of ions, mg/kg soil									
		NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	PO_4^{3-}
Место естественного произрастания Place of natural growth	4,5±0,1	9,5± 1,4	78± 13	35± 6	7,5 ± 1,2	30 ± 5	124 ± 19	15,5 ±2,3	119 ±18	0,5± 0,1	3,0± 0,5
Место посадки Landing site	5,6±0,1	5,5± 0,9	137± 22	52± 8	9,5± 1,5	31± 5	195± 29	21,5± 3,2	81± 12	1,5± 0,2	1,0± 0,2

Таблица 2 / Table 2

Оценка жизненности *Anemone nemorosa* / Assessment of the vitality of the *Anemone nemorosa*

№ No.	Показатели растений Plant indicators	Местные популяции Local populations	Транслокационная популяция Translocation population
1	Общее состояние растений The general condition of the plants	хорошее good	хорошее good
2	Высота растений, см Plant height, cm	13–15	10–15
3	Цветение Flowering	присутствует is present	присутствует is present
4	Число цветков, экз./м^2 Number of flowers, ind./m^2	25–30	20–25
5	Вегетативное размножение Vegetative reproduction	очень обильное very plentiful	обильное plentiful
6	Болезни, вредители Diseases and pests	не обнаружено not detected	не обнаружено not detected

Мониторинговые мероприятия, проведённые весной 2020 г., показали, что общее состояние растений хорошее, средняя высота составляет 10–15 см, цветение присутствует (до 25 цветов на 1 м^2) и не отличается от средних показателей этого же вида в ближайших популяциях (табл. 2). Наблюдается активное разрастание популяции вегетативным путём (корневищем). У пересаженных растений не обнаружены наличие болезней и вредителей, признаки угнетения. В результате обследования можно сделать вывод, что новая популяция ветреницы дубравной имеет высокую способность к самоподдержанию в новых условиях.

Заключение

A. nemorosa успешно перенесла осеннюю пересадку в новое место и в настоящее время представляет собой сформировавшуюся популяцию, способную к самоподдержанию. Мониторинговые исследования подтвердили устойчивость образованной искусственной популяции *A. nemorosa*, что является важным фактором для её самовозобновления, сохранения биологического разнообразия редких и исчезающих растений, целостности экосистемы данной территории.

Разработанная методика по пересадке *A. nemorosa* поздней осенью позволяет в некоторых случаях раздвинуть временные границы для транслокации редких и исчезающих видов растений и, в случае реального воздействия на них антропогенного фактора, сохранить ценные популяции.

Для поддержки и большей эффективности проведения подобных работ, местам с искусственными популяциями следует придавать охранный статус. В местах нахождения ценопопуляций целесообразно создание особо охраняемой природной территории, а в случае отсутствия такой возможности – введение ограничений на хозяйственную деятельность.

References

1. Kapelkina L.P., Teplyakova T.E. Specially protected species of vascular plants in the protected zone of oil pipelines of the Yaroslavl region // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 54–59 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-1-054-059

2. Grulich V. Red List of vascular plants of the Czech Republic: 3rd edition // Preslia. 2012. V. 84. P. 631–645 (in Czech). doi: 10.23855/prelsia.2018.367

3. Bilz M., Kell S.P., Maxted N., Lansdown R.V. European Red List of vascular plants. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. 130 p. doi: 10.2779/8515

4. Polska czerwona lista paprotnikow i roslin kwiatowych. Krakow: Instytut Ochrony Przyrody Polskiey Akademii Nauk, 2016. 44 p. (in Polish).

5. Gaponenko N.B. Introduction of rare plant species – as a method of biodiversity conservation in botanical gardens and dendroparks // Hortus botanicus. 2001. P. 89–90 (in Russian).

6. Kapelkina L.P., Teplyakova T.E. Transplanting and rehabilitation of red book plant species as a method of their conservation in the conditions of technogenesis // Environmental, industrial and energy safety. Sevastopol': Izd-vo Sevastopol'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. P. 580–583 (in Russian).

7. Chauhan R.S. Biotechnological approaches for conservation of rare, endangered and threatened plants // International Journal of Scientific and Research Publications. 2016. V. 6. No. 12. P. 10–14.

8. Pathak M.K., Abido M.S. The role of biotechnology in the conservation of biodiversity // Journal of Experimen-

tal Biology and Agricultural Sciences. 2014. V. 2. No. 4. P. 352–363.

9. Rai M.K. Review: biotechnological strategies for conservation of rare and endangered medicinal plants // Biodiversitas. 2010. No. 11. P. 157–166. doi: 10.13057/biodiv/d110310

10. Viktorov V.P., Kuranova N.G., Chernyaeva E.V. Conservation strategy of rare plants // Vestnik of Tver State University. Series "Biology and Ecology". 2018. No. 3. P. 106–129 (in Russian).

11. Gaponenko N.B., Gnatyuk A.N. Formation of introduction populations of plants as a way of preserving the rare florofund // Bulletin of the Botanical Garden-Institute. 2016. No. 15. P. 13–15 (in Russian).

12. Loznuho I.V., Danilyuk V.K., Linnik V.S., Kontsevaya T.G. Reproduction features of rare species during introduction // Botanical Gardens: state and prospects of conservation, study and use of the biological diversity of the plant world. Minsk: BSPU, 2002. P. 171 (in Russian).

13. Novikov V.S., Gubanov I.A. The popular atlas-determinant. Wild plants. Moskva: Bustard, 2004. 416 p. (in Russian).

14. Kombarova M.M. Comprehensive assessment of highly protected primrose populations in the territory of the Sosnovy Bor settlement park in the city of Perm // PNRTU Bulletin. Urbanism. 2012. No. 1. P. 131–141 (in Russian).

15. Hao D., Gu X., Xiao P. *Anemone* medicinal plants: ethnopharmacology, phytochemistry and biology // Acta Pharmaceutica Sinica B. 2017. V. 7. No. 2. P. 146–158. doi: 10.1016/j.apsb.2016.12.001

16. Bulatović V., Gorunović M. Flavonoids of wood anemone (*Anemone nemorosa* L., Ranunculaceae) // Pharmaceutica Acta Helvetiae. 1995. V. 70. No. 3. P. 219–221.

17. Rogovsky V.S., Matyushin A.I., Shimanovsky N.L. Prospects for the use of quercetin preparations for the prevention and treatment of atherosclerosis // International Medical Journal. 2011. No. 3. P. 114–118 (in Russian).

18. *Anemone nemorosa* L. [Internet resource] http://edoopt.ru/vetrenitsa-dubravnaya (Accessed: 22.06.2020).

19. Shoba S.A. National atlas of soils of the Russian Federation. Moskva: Astrel, 2011. 632 p. (in Russian).

20. Saodatova R.Z., Ershova A.A. Experience of introduction of protected plants of the Moscow region on the exposition of the flora of Eastern Europe of the GBS RAS // VEFU NEFU. 2016. No. 5. P. 54–66 (in Russian).

21. Saodatova R.Z., Konovalova T.Yu., Ershova A.A., Shvetsov A.N. Plant introduction of the Red Book of the Moscow Region in the GBS RAS // Bulletin of the Main Botanical Garden. 2017. No. 1 (203). P. 3–14 (in Russian).

22. Polyakova G.A., Melancholin P.N. The current state of abandoned planting of local species of herbaceous plants in the suburbs // Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Department of Biology. 2013. V. 118. No. 3. P. 57–62 (in Russian).

23. Curtis F., Hugh L., Henry A.L. Plant rhizome positioning in the soil and under litter: Trade-offs of frost avoidance versus growth // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. 2019. V. 41. Article No. 125500. doi: 10.1016/j.ppees.2019.125500

24. Baeten L., Frenne P.D., Thomaes A., Demey A., Muys B., Verheyen K. Forest herbs show species-specific responses to variation in light regime on sites with contrasting soil acidity: An experiment mimicking forest conversion scenarios // Basic and Applied Ecology. 2014. V. 15. No. 4. P. 316–325. doi: 10.1016/j.baae.2014.05.002

25. Couwenberghe R.V., Collet C., Lacombe E., Gégout J.-C. Abundance response of western European forest species along canopy openness and soil pH gradients // Forest Ecology and Management. 2011. V. 262. No. 8. P. 1483–1490. doi: 10.1016/j.foreco.2011.06.049

26. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I. Soil chemistry. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2005. 561 p. (in Russian).

27. Falkengren-Grerup U., Quist M.E., Tyler G. Relative importance of exchangeable and soil solution cation concentrations to the distribution of vascular plants // Environmental and Experimental Botany. 1995. V. 35. No. 1. P. 9–15.

28. Honnay O., Hermy M., Coppin P. Impact of habitat quality on forest plant species colonization // Forest Ecology and Management. 1999. V. 115. No. 2–3. P. 157–170.

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-147-152

The influence of some factors on cyanobacteria and algae biodiversity in karst speleogenesis

© 2021. Sh. R. Abdullin ORCID: 0000-0002-6946-2321,
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
159, 100-letiya Vladivostoka Prospekt, Vladivostok, Russia, 690022,
e-mail: crplant@mail.ru

The biodiversity of underground habitats is of considerable interest from different standpoints, but information on the biota of the caves is incomplete and fragmentary. In this regard, the identification of different factors that influence the richness of species of various organisms, including cyanobacteria and algae, is important. 166 different samples, which were collected in 2007–2012 from 14 karst caves of natural origin, located in various climatic zones of Russia, were investigated. 121 species and intraspecific taxa of cyanobacteria and algae belonging to five phyla (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Ochrophyta, Chlorophyta, Streptophyta) were identified in the studied caves. Based on the obtained material, the influence of some abiotic factors (the stage of karst speleogenesis, the length of the cave, and the area of the entrance, the underlying rocks and the surface climate) on the biodiversity of cyanobacteria and algae was analyzed using statistical methods. The speleogenesis stage (the influence of the factor is 118.4, $p < 0.05$) mostly effect on the species richness of cyanobacteria and algae in the studied caves that directly related to the level of water. Also the underlying rocks (the influence of the factor is 34.7, $p < 0.05$) and the length of the cave (the influence of the factor is 20.3, $p < 0.05$) effect on the biodiversity of cyanobacteria and algae in these caves. It was revealed that the relationship between the total number of species of cyanobacteria and algae and the various stages of speleogenesis is statistically significant ($p < 0.05$), and the species richness of these organisms decreases from the corridor-grotto stage to the corridor-grotto-chamber stage. The number of species of Cyanobacteria and Bacillariophyta also decreased statistically significantly ($p < 0.05$) in the stages of karst speleogenesis: corridor-grotto, corridor-grotto-lake, corridor-grotto-chamber.

Keywords: cyanobacteria and algae, biodiversity, abiotic factors, the stages of karst speleogenesis, caves, Russia.

УДК 581.5

Влияние некоторых факторов на биоразнообразие цианобактерий и водорослей в карстовом спелеогенезе

© 2021. Ш. Р. Абдуллин, д. б. н., в. н. с.,
Федеральный Центр биоразнообразия наземной биоты
Восточной Азии ДВО РАН,
690022, Россия, г. Владивосток, Проспект 100-летия Владивостока, д. 159,
e-mail: crplant@mail.ru

Биоразнообразие подземных местообитаний представляет значительный интерес с различных точек зрения, но информация о биоте пещер является неполной и фрагментарной. В связи с этим важно выявление различных факторов, которые влияют на разнообразие видов различных организмов, включая цианобактерии и водоросли. Исследовано 166 различных проб, отобранных в 2007–2012 гг. из 14 карстовых пещер естественного происхождения, расположенных в различных климатических зонах России. В изученных пещерах идентифицирован 121 вид и внутривидовой таксон цианобактерий и водорослей, относящихся к пяти отделам: Cyanobacteria, Bacillariophyta, Ochrophyta, Chlorophyta и Streptophyta. На основе полученного материала с использованием статистических методов проанализировано влияние некоторых абиотических факторов (стадия карстового спелеогенеза, протяжённость пещеры, площадь входа, вмещающие породы и климат поверхности) на биоразнообразие цианобактерий и водорослей. Установлено, что наибольшее влияние на видовое богатство цианобактерий и водорослей в исследованных пещерах оказывает стадия спелеогенеза (сила влияния фактора – 118,419, $p < 0{,}05$), непосредственно связанная с уровнем обводнённости полостей, а также залегающие породы (сила влияния фактора – 34,665, $p < 0{,}05$) и протяжённость пещеры (сила влияния фактора – 20,288, $p < 0{,}05$). Выявлено, что связь между общим числом видов цианобактерий и водорослей и различными этапами спелеогенеза является статистически значимой ($p < 0{,}05$), и видовое богатство этих организмов снижается от коридорно-гротовой до коридорно-грото-камерной стадии. Число представителей отделов Cyanobacteria и Bacillariophyta также статистически значимо ($p < 0{,}05$) и снижается в ряду: коридорно-гротовая, коридорно-грото-озёрная, коридорно-грото-камерная стадии развития пещер.

Ключевые слова: цианобактерии и водоросли, биоразнообразие, абиотические факторы, стадии карстового спелеогенеза, пещеры, Россия.

Many different environmental factors influence the distribution of cyanobacteria and algae in various ecosystems [1, 2]. Caves are the natural subterranean spaces in the underground that are accessible to humans. They are the harbor of unique ecosystems with a peculiar biota including bacteria, fungi, animals, and plants [3]. Some cyanobacteria and algae can be mixotrophs [4] and can grow in dark areas of caves as well. The biodiversity of underground habitats is of considerable interest from taxonomic, evolutionary, ecological, biogeographic and conservation standpoints [3], but information on the biota of the caves is incomplete and fragmentary. In this regard, the identification of different factors (in particular stages of karst speleogenesis) that influence the richness of species of various organisms, including cyanobacteria and algae, is important.

There are various classifications of karst speleogenesis. We suppose, that the classification of [5] is the most convenient to study the differences in cyanobacteria and algae diversity at different stages of the speleogenesis, because it most fully shows changes in abiotic factors that can affect the distribution of these organisms. This classification recognizes following stages: 1. Interstitial stage. The extension of cracks occurs by corrosion and later by erosion. No deposits are formed. 2. Slit stage. In the phreatic conditions, cracks increase in the slits by corrosion, and then erosion. No deposits are formed yet. 3. Canal stage. Due to erosion and corrosion, the slits expand in the elliptical channels in the phreatic conditions. No deposits are formed. 4. Corridor-grotto stage. Underground streams are present in the cave and intensively expand the cave due to erosion and corrosion. Flowstones begin to form. 5. Corridor-grotto-lake stage. Cave consists of grottoes and connecting those corridors with separate flowing and non-flowing lakes. 6. Corridor-grotto-chamber stage. The corridors and grottos are split up on chambers due to landslide and water-chemogenic sediments. There are no permanent watercourses or water bodies [5].

During the evolution of karst caves, degree of their interconnection and exchange of energy and matter with the surface change significantly [6]. That affects the changes in caves ecosystems and biota. It has been known that a change in the stages of the speleogenesis leads to speleofauna transformation [3, 7]. Besides, the richness of animal species could also be influenced by the length of the cave [7] and the surface climate [3, 7]. However, data on the impact of these factors on the biodiversity of cyanobacteria and algae are still absent. That is why, the aim of our study was to analyze using statistical methods the influence of some abiotic factors, including various stages of speleogenesis, on the biodiversity of cyanobacteria and algae in karst caves.

Material and methods

In the Russian Federation, rich in caves [8] cyanobacteria and algae have been studied in over 50 caves [9]. However, for this study, only caves at clearly distinguishable stages of speleogenesis were selected. No caves at the interstitial, slit, and canal stages of speleogenesis were studied due to their inaccessibility. 14 caves of natural origin at the different stages of speleogenesis from various regions situated at varied climatic zones of Russia were studied (Table 1). Most caves overlying in limestone, gypsum, Komarinaya cave – in limestone and sandstone. There are different types of water, accordingly with karst speleogenesis stage in studied caves. The cave parameters are listed in Table 1.

From 2007 to 2012 166 different underground samples were collected. Sampling points were selected randomly along the entire length of each cave. Samples were collected by modified standard methods [11]. Identification of the species composition of cyanobacteria and algae was performed by direct light microscopy and after cultivation of the samples in modified liquid nutrient medium No. 6 [11, 12] in a culture chamber where they were illuminated for 12 hours per day with a light intensity of 2500–3000 lx (17.9–21.4 μmol photons/($m^2 \cdot s$)) and temperature +20 to +22 °C. All of the sample material was examined every two weeks during an eight-month cultivation period. All cyanobacteria and algae were identified using a LOMO "Mikmed-1" light microscope. A number of identification keys were consulted [12–20]. The taxonomy of the cyanobacteria and algae is presented according to [21]. The frequency of occurrence (F) of individual species was determined using formula:

$$F = a/A \cdot 100\%,$$

where a – the number of samples in which the species was revealed; A – the total number of samples [22].

To analyse the relationship between cyanobacteria and algae species richness and the potential variables (the stage of karst speleogenesis, the length of the cave, and the area of the entrance, the underlying rocks and the surface

Table 1

The parameters of investigated caves

Caves	I	II	III	IV	V	VI	VII
Golubinskiy Proval	1622	3	PS	I	G	A	1
Pevcheskaya Estrada	305	3	PS	I	G	A	1
Baskunchakskaya	1480	1	PL	II	G	B	2
Rossiyskaya	1800	2	PL	II	L	C	3
Ikskaya	50	1	WHG	III	G	C	4
Kueshta	800	2	PS	I	G	C	5
Hlebodarovskaya	3550	2	WHG	III	L	C	6
Komarinaya	475	2	WHG	III	LS	C	7
Alenushka	108	1	PL	II	L	C	8
Verchniy Ponor	62	1	PS	I	L	C	8
Shumyaschiy Ponor	117	1	PS	I	L	C	8
Essyumskaya	215	1	PS	I	L	C	8
Nizhnyaya Iogachskaya	40	2	WHG	III	L	D	9
Belyy Dvorec	120	3	PL	II	L	E	10

Notes: I – length, m. II – area of the entrance: 1 – < 1 m²; 2 – 1–10 m²; 3 – > 10 m². III – water: PS – permanent stream or streams; PL – permanent lake or lakes; WHG – occasional areas of water, humid ground. IV – speleogenesis stage [5]: I – corridor-grotto; II – corridor-grotto-lake; III – corridor-grotto-chamber. V – overlying rock: G – gypsum, L – limestone, LS – limestone and sandstone. VI – type of surface climate [10]: A – northern part of forest area of temperate climate zone; B – semi-desert area of temperate climate zone; C – temperate continental climate zone; D – sharply continental climate zone; E – temperate monsoon climate zone. VII – location:1 – Arkhangelsk Region, Pinezhsky district; 2 – Astrakhan region, Akhtubinsky district; 3 – Perm Territory, Gubakhinsky district; 4 – Republic of Bashkortostan, Tuymazinsky district; 5 – Republic of Bashkortostan, Iglinsky district; 6 – Republic of Bashkortostan, Meleuzovsky district; 7 – Chelyabinsk region, Ashinsky district; 8 – Chelyabinsk region, Katav-Ivanovsky district; 9 – Republic of Altai, Turochak district; 10 – Primorsky Territory, Partisan district.

Table 2

Biodiversity of cyanobacteria and algae in the studied karst caves at various stages of speleogenesis

Cave	Speleogenesis stage	Cyan	Bacill	Ochr	Chlor	Strept	Total
Essyumskaya	I	14	15	0	9	1	39
Verchniy Ponor		15	17	0	6	0	38
Golubinskiy Proval		14	12	0	10	1	37
Shumyaschiy Ponor		13	16	0	5	1	35
Pevcheskaya Estrada		11	7	0	11	2	31
Kueshta		6	16	0	6	2	30
Total		35	37	0	18	3	93
Baskunchakskaya	II	7	5	0	12	1	25
Belyy Dvorets		7	2	1	9	0	19
Rossiyskaya		6	5	0	6	0	17
Alenushka		5	2	0	8	1	16
Total		13	13	1	22	1	50
Ikskaya	III	3	7	0	5	1	16
Nizhnyaya Iogachskaya		6	3	0	6	0	15
Khlebodarovskaya		5	4	0	2	1	12
Komarinaya		1	1	0	9	0	11
Total		9	11	0	14	1	35

Note: The name of the stages of speleogenesis is the same as in Table 1. Cyan – Cyanobacteria, Bacill – Bacillariophyta, Chlor – Chlorophyta, Strept – Streptophyta.

climate), a dispersion analysis with covariates was applied [23]. To assess the effect of different stages of speleogenesis on the species richness of cyanobacteria and algae, the nonparametric one-way dispersion analysis using Kruskal-Wallis criteria was used, given the low sample size (n = 14 caves) [23]. The analysis was carried out using package Statistica version 10.0.

Results and Discussion

Based upon examination of 166 samples collected in 14 caves, 121 species and intraspecific taxa of cyanobacteria and algae, belonging to five phyla (Cyanobacteria – 40 species and intraspecific taxa, Bacillariophyta – 44 species and intraspecific taxa, Ochrophyta – 1 species, Chlorophyta – 33 species, Streptophyta – 3 species) were identified (Table 2).

The species *Mychonastes homosphaera* (Skuja) Kalina & Punc (F = 93%), *Nostoc punctiforme* Har. (F = 79%), *Leptolyngbya boryana* (Gom.) Anagn. & Kom. (F = 79%), *Leptolyngbya gracillima* (Zopf ex Hansg.) Anagn. & Kom. (F = 79%), *Hantzschia amphioxys* (Ehr.) Grun. in Cleve & Grun. (F = 79%), *Phormidium ambiguum* Gom. (F = 71%), *Muriella terrestris* J.B. Petersen (F = 64%), *Nostoc paludosum* Kütz. ex Bor. & Flah. (F = 57%), *Nitzschia palea* (Kütz.) W.Sm. (F = 57%), *Klebsormidium flaccidum* (Kütz.) P.C. Silva, K.R. Mattox & W.H. Black. (F = 57%), *Chlorococcum infusionum* (Schrank) Menegh. (F = 57%), *Chlorococcum minutum* R.C. Starr (F = 57%), *Stichococcus bacillaris* Näg. (F = 57%), *Sellaphora pupula* (Kütz.) Mereschk. (F = 50%), *Chlorella vulgaris* Beyer. [Beijer.] (F = 50%), *Muriella magna* F.E. Fritsch & R.P. John (F = 50%) were found in most of the caves. The same species appears to be typical for cave algal flora and were often revealed in other studied caves in Russia [9]. In addition, most of these taxa are diagnostic species of syntaxa of various levels belonging to the class of cave cyanobacteria and algae ***Mychonastetea homosphaerae*** [9, 24].

The largest number of cyanobacteria and algae species was found in the caves Essyumskaya, Verkhniy Ponor, Golubinskiy Proval, Shumyashchiy Ponor, Pevcheskaya Estrada and Kueshta (Table 2), which are at the corridor-grotto stage of speleogenesis. The bulck of the flora in caves at corridor-grotto stage was formed by species of Cyanobacteria and Bacillariophyta, and at this stage the largest number of species from the Streptophyta was revealed (Table 2). In the caves of the corridor-grotto-lake and corridor-grotto-chamber stages, species of green algae predominated (Table 2).

Dispersion analysis with covariates showed that the speleogenesis stage has the greatest ef-

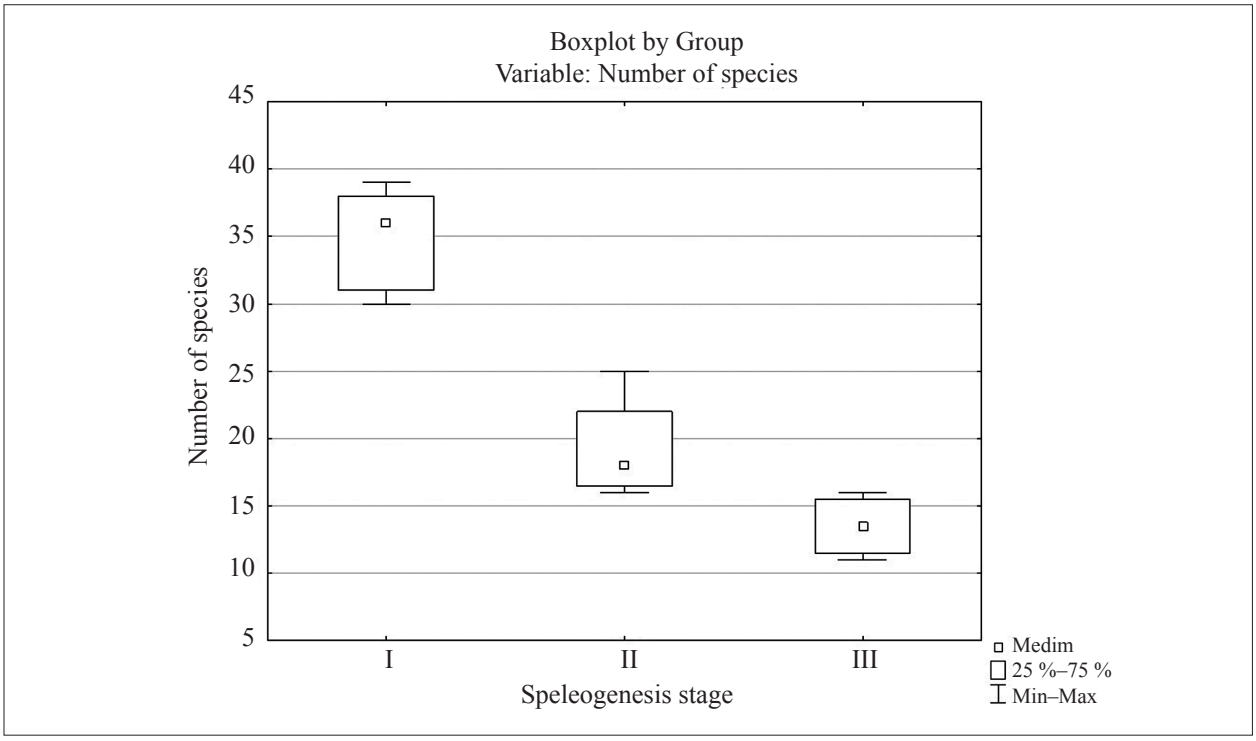


Fig. Influence of different stages of speleogenesis on the number of species of cyanobacteria and algae
Note: The stages of speleogenesis are denoted by numbers:
I – corridor-grotto stage; II – corridor-grotto-lake stage; III – corridor-grotto-chamber stage

fect on the species richness of cyanobacteria and algae in the investigated caves (the influence of the factor is 118.4, $p < 0.05$). Also the overlying rocks (the influence of the factor is 34.7, $p < 0.05$) and the length of the cave (the influence of the factor is 20.3, $p < 0.05$) effect on the biodiversity of cyanobacteria and algae in these caves. The entrance area and surface climate did not have a statistically significant effect on the biodiversity of cyanobacteria and algae ($p > 0.05$). It was also found that the relationship between the total number of species of cyanobacteria and algae and different stages of speleogenesis is valid ($p < 0.05$), and species richness of these organisms decreases from the corridor-grotto stage to the corridor-grotto-chamber stage (Fig.). The number of species of Cyanobacteria and Bacillariophyta also decreased statistically significantly ($p < 0.05$) in the stages of karst speleogenesis: corridor-grotto, corridor-grotto-lake, corridor-grotto-chamber.

It is known that running water plays an important role into the entering of cyanobacteria and algae in caves [3, 11]. That is why, the stage of speleogenesis, which directly relate to the level of watering of the cavities, has the greatest effect on the biodiversity of cyanobacteria and algae in the investigated caves in comparison with other factors. This factor also influenced the biodiversity of the fauna [3, 7]. The decrease in the total number of cyanobacterial and algal species at different stages of speleogenesis is apparently associated with the presence of streams in the corridor-grotto stage, reservoirs – in the corridor-grotto-lake stage, and their absence at the corridor-grotto-chamber stage. The overlying rocks may be responsible for the chemistry of the habitat for cyanobacteria and algae in caves. The length of the cave, as in the case of animals [7], can be directly related to the number and diversity of microhabitats. The absence of a statistically significant effect of the surface climate on the biodiversity of cyanobacteria and algae is apparently due to the fact that all the investigated caves are located in different types of the temperate climatic zone, and their underground microclimate is practically the same. It is not clear why the cave entrance area does not affect the species richness of cyanobacteria and algae, since most of these organisms are phototrophs and should depend on the level of illumination. Probably, this is due to the fact that cyanobacterial-algal cenoses with a relatively constant species composition, belonging to the alliance ***Stichococco minori–Klebsormidion flaccidi*** [24], are formed in the entrance illuminated zone of the caves [9, 24, 25]. While the entering of species into the dark zone and their accumulation there occurs constantly, a "bank of spores" is formed [9], due to which the biodiversity is even higher than in the entrance illuminated zone.

Conclusion

Thus, 121 species and intraspecific taxa of cyanobacteria and algae belonging to five phyla (Cyanobacteria – 40 species and intraspecific taxa, Bacillariophyta – 44 species and intraspecific taxa, Ochrophyta – 1 species, Chlorophyta – 33 species, Streptophyta – 3 species) were identified in 14 karst caves of natural origin, located in different climatic zones of Russia. The species *Mychonastes homosphaera*, *Nostoc punctiforme*, *Leptolyngbya boryana*, *L. gracillima*, *Hantzschia amphioxys*, *Phormidium ambiguum*, *Muriella terrestris*, *Nostoc paludosum*, *Nitzschia palea*, *Klebsormidium flaccidum*, *Chlorococcum infusionum*, *C. minutum*, *Stichococcus bacillaris*, *Sellaphora pupula*, *Chlorella vulgaris* and *Muriella magna* most often found in caves. Most of them are diagnostic species of syntaxa of various levels belonging to the class ***Mychonastetea homosphaerae*** [9]. The largest number of cyanobacteria and algae species was found in the caves, which are at the corridor-grotto stage of speleogenesis. At this stage species of Cyanobacteria and Bacillariophyta dominated, and the largest number of species from the Streptophyta was revealed. In the caves of the corridor-grotto-lake and corridor-grotto-chamber stages, species of green algae predominated. Statistical analyses showed that the speleogenesis stage, directly related to the level of water, has the greatest influence on the species richness of these organisms in the investigated caves. The overlying rocks and the length of the cave also effect on the biodiversity of cyanobacteria and algae in these caves. The surface climate and entrance area did not have a statistically significant influence on the biodiversity of cyanobacteria and algae. It was also revealed that the relationship between the total number of cyanobacteria and algae species and different stages of speleogenesis is valid, and species richness of these organisms, the number of species of Cyanobacteria and Bacillariophyta decreased statistically significantly in the stages of karst speleogenesis: corridor-grotto, corridor-grotto-lake, corridor-grotto-chamber.

The author want to thank to Dr. A.A. Goncharov from Federal Scientific Center of East Asian

Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, The Russian Academy of Sciences for the first reading of the manuscript and critical remarks.

References

1. Kondakova L.V., Domracheva L.I., Bezdenezhnykh K.A., Kondakova I.A., Ashikhmina T.Ya. Soil algae and cyanobacteria of coniferous phytocenosis with different levels of anthropogenic impact // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 4. P. 91–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-091-100

2. Barinova S.S. Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 51–57 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-051-057

3. Culver D.C., Pipan T. The biology of caves and other subterranean habitats. New York: Oxford University Press, 2019. 336 p.

4. Abdullin Sh.R., Bagmet V.B. Experimental analysis for the possibility of heterotrophy in algae: the example of some strains from the Propashchaya Yama Cave // Russian Journal of Ecology. 2015. V. 46. No. 5. P. 481–482. doi: 10.1134/S1067413615050033

5. Dublyansky V.N., Vakhrushev B.A., Dublyanskaya G.N. Theoretical foundations of speleological zoning // Karst mapping and zoning in connection with the development of territories: Sbornik statey. Vladivostok, 1986. P. 10–11 (in Russian).

6. Klimchouk A.B. Evolutionary typology of karst // Speleologiya i karstologiya. 2010. V. 4. P. 23–32 (in Russian).

7. Jiménez-Valverde A., Sendra A., Garay P., Reboleira A.S.P.S. Energy and speleogenesis: Key determinants of terrestrial species richness in caves // Ecology and Evolution. 2017. V. 7. P. 10207–10215. doi: 10.1002/ece3.3558

8. Shelepin A.L., Vakhrushev B.A., Gunko A.A., Gusev A.S., Prokhorenko A.I., Samokhin G.V., Filippov A.G., Tsurikhin E.A. Atlas of caves of Russia. Moskva: Russkoe Geograficheskoe Obshchestvo, Rossiyskiy Soyuz Speleologov, 2019. 768 p. (in Russian).

9. Abdullin Sh.R., Mirkin B.M. Syntaxonomy of cyanobacterial-algal cenoses of caves in Russia and some neighboring states // Rastitelnost Rossii. 2015. V. 27. P. 3–23 (in Russian).

10. Alisov B.P. Climatic provinces and regions of the USSR. Moskva: Izdatelstvo Geografgiz, 1947. 212 p. (in Russian).

11. Abdullin Sh.R. Cyanobacterial-algal cenoses of the Shulgan-Tash cave, Southern Urals // Russian Journal of Ecology. 2009. V. 40. No. 4. P. 301–303. doi: 10.1134/S1067413609040122

12. Gromov B.V. Collection of algae cultures of the Biological Institute of Leningrad University // Trudy Petergofskogo biologicheskogo instituta LGU. 1965. V. 19. P. 125–139 (in Russian).

13. Zabelina M.M., Kiselev I.A., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova V.S. Keys to freshwater algae of the USSR. Issue 4. Diatoms. Moskva: Sovetskaya nauka, 1951. 620 p. (in Russian).

14. Gollerbach M.M., Kosinskaya E.K., Polyansky V.I. Blue-green algae. Keys to freshwater algae of the USSR. Issue 2. Moskva: Sovetskaya nauka, 1953. 654 p. (in Russian).

15. Ettl H., Gärtner G. Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen. Jena: Spektrum Akademischer Verlag, 1995. 721 p. (in German).

16. Andreeva V.M. Soil and aerophilic green algae (Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales). Sankt-Peterburg: Nauka, 1998. 352 p. (in Russian).

17. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokariota. 1. Teil: Chroococcales // Süβwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, G. Gärtner, H. Heynig, D. Mollenhauer. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1998. 548 p.

18. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales // Süβwasserflora von Mitteleuropa / Eds. B. Büdel, G. Gärtner, L. Krienitz, M. Schagerl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2005. 759 p.

19. Komárek J. Cyanoprokaryota 3. Teil. 3rd Part: Heterocystous genera // Süsswasserflora von Mitteleuropa / Eds. B. Büdel, G. Gärtner, L. Krienitz, M. Schagerl. Heidelberg: Springer Spektrum, 2013. 1130 p.

20. Lange-Bertalot H., Hofmann G., Werum M., Cantonati M. Freshwater benthic diatoms of Central Europe: over 800 common species used in ecological assessments. Schmitten-Oberreifenberg: Koeltz Botanical Books, 2017. 942 p.

21. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Internet resource] http://www.algaebase.org/ (Accessed: 13.08.2020).

22. Kuzyakhmetov G.G., Dubovik I.E. Methods for studying soil algae. Ufa: Izdatelstvo RIO BashGU, 2001. 56 p. (in Russian).

23. StatSoft. Electronic textbook on statistics [Internet resource] http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm/ (Accessed: 20.09.2020).

24. Abdullin Sh.R. The syntaxonomical diversity features of cyanobacterial and algal communities in the underground and surface watercourse // Phytocoenologia. 2020. V. 50. No. 3. P. 235–248. doi: 10.1127/phyto/2020/0345

25. Abdullin Sh.R. Effect of illumination on the distribution of phototrophic organisms in the entrance part of the Shulgan-Tash cave // Russian Journal of Ecology. 2011. V. 42. No. 3. P. 249–251. doi: 10.1134/S1067413611030039

УДК 631.529:582.675.1[470.57-25] doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-153-159

Влияние метеоусловий и видовых особенностей на прохождение фенодат клематисов в Башкирском Предуралье

© 2021. Л. М. Абрамова, д. б. н., профессор, г. н. с.,
Р. А. Билалова, к. б. н., м. н. с., Р. В. Вафин, к. б. н., в. н. с.,
З. Х. Шигапов, д. б. н., директор,
Южно-Уральский ботанический сад-институт –
обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, корп. 3,
e-mail: nroza@mail.ru

Представлены результаты фенологических наблюдений 21 вида рода *Clematis* L., проведённых в Южно-Уральском ботаническом саду (г. Уфа) в 2007–2020 гг. Отмечали сроки 9 фенофаз: раскрытие почек, начало и окончание роста побегов, начало, окончание и продолжительность цветения, созревание плодов, окончание и продолжительность вегетации. Для оценки связи фенофаз между собой использовали корреляционный анализ, влияние видовых и годовых метеорологических особенностей оценивали двухфакторным дисперсионным анализом. Вегетация у клематисов начинается в основном в III декаде апреля. Фазы начала и окончания цветения являются индивидуальным признаком для каждого вида. Плодоношение наступает через 2–2,5 месяца после начала цветения. Только 11 видов из 21 плодоносят, остальные не успевают образовать семена из-за позднего цветения. Вегетация заканчивается в конце сентября – начале октября с наступлением первых заморозков. На начало наступления всех фаз, кроме длительности вегетации, достоверно влияют видовые особенности. Фенологические даты начала раскрытия почек, начала и окончания роста побегов, конца вегетации и продолжительности вегетации достаточно сильно изменяются в зависимости от погодных условий конкретного года.

Ключевые слова: *Clematis* L., сезонный ритм развития, фенодата.

The influence of weather conditions and species characteristics on the passage of phenodates of clematis in the Bashkir Cis-Urals

© 2021. L. M. Abramova ORCID: 0000-0002-3196-2080, **R. A. Bilalova** ORCID: 0000-0002-0449-6205,
R. V. Vafin ORCID: 0000-0002-4374-0696, **Z. Kh. Shigapov** ORCID: 0000-0003-2613-4712,
South-Ural Botanical Garden-Institute of Ufa Federal Research
Center of Russian Academy of Sciences (BGI USC RAS),
195/3, Mendeleeva St., Ufa, Russia, 450080,
e-mail: nroza@mail.ru

Results of the phenological observations of 21 species of the *Clematis* L. genus, which are carried out in the South-Ural botanical garden institute of UFRC RAS (Ufa) from 2007 to 2020 are presented in the article. The timing of the onset of 9 phenophases was noted: breaking of buds, beginning and end of growth of shoot, beginning, termination and duration of blossoming, maturing of fruits, termination and duration of vegetation. Correlation analysis was used to assess the relationship between phenophases, the influence of species and annual meteorological features was estimated by two-factor dispersion analysis. It was revealed that the vegetation in clematis begins mainly in the III decade of April. The phases of the beginning and end of flowering are an individual feature for each species. Fruiting usually occurs 2–2.5 months after the beginning of flowering. Only 11 species out of 21 bear fruit, as the rest ones do not have time to form full-fledged seeds due to late flowering. Vegetation ends in late September – early October with the onset of the first frost. The onset of all phases, except for the duration of vegetation, is reliably influenced by species features. Phenodates of breaking of buds, growth beginning and end of shoot growth, the end of vegetation and the duration of vegetation are subject to fluctuations depending on the climatic conditions of a particular year.

Keywords: *Clematis* L., seasonal rhythm of development, phenodate.

Фенологические наблюдения имеют важное значение в понимании адаптационных возможностей растений при переносе в новые регионы; они позволяют выявить полноту прохождения фенологического развития видов растений и их адаптацию к климатическим условиям в новых местообитаниях [1–3].

Большой популярностью в современном ландшафтном дизайне пользуются древовидные вьющиеся растения, особенно декоративноцветущие виды, ассортимент которых на Южном Урале достаточно ограничен. К этой группе растений относятся клематисы (род *Clematis* L.). Это крупный род, имеющий большое число видов и жизненных форм [4, 5]. Однако во флоре Республики Башкортостан из видов данного рода произрастает только *Atragene speciosa*, виды и сорта клематиса недостаточно распространены в культуре в регионах Поволжья и Урала, поэтому их интродукционное испытание представляет большой практический интерес.

Часть ботаников делит клематисы на 2 самостоятельных рода: *Clematis* L. – клематис и *Atragene* L. – княжик [6, 7]. Специалисты, которые работают с клематисами, придерживаются системы рода, предложенной в основополагающих работах [8–11], в которых *Atragene* включён, как секция, в род *Clematis*. Эту систему мы использовали в настоящей работе.

Коллекция клематисов Южно-Уральского ботанического сада (ЮУБСИ) формировалась с 1968 г. На сегодняшний день она включает 21 вид из секций *Viorna* (подсекции *Tubulosae*, *Crispae*, *Orientales*, *Tanguticae*), *Atragene*, *Clematis* (подсекции *Vitalbae*, *Rectae*, *Angustifoliae*), *Viticella* (подсекция *Viticella*) и 58 сортов [12, 13]. Интродукция происходила семенами и саженцами в основном из ботанических садов России, а также Европы (Германия, Польша, Латвия).

Целью работы были многолетние наблюдения сезонного ритма развития видовых клематисов (21 вид) и оценка влияния климатических условий и видовых особенностей на прохождение фенодат.

Материалы и методы исследования

Наблюдения за сезонным ритмом развития проводились в Южно-Уральском ботаническом саду УФИЦ РАН (г. Уфа) согласно «Методике фенологических наблюдений в ботанических садах СССР» [2] с 2007 по 2020 гг. Отмечались 9 основных фенофаз: раскрытие почек, начало и конец роста побегов, начало, конец и продолжительность цветения, созревание плодов, окончание и продолжительность вегетации. Фазы начала осеннего расцвечивания листьев и листопада не рассматривались, поскольку в условиях Башкирского Предуралья виды клематиса не имеют настоящего расцвечивания листьев и листопада. Автохтонным видом является *Atragene speciosa*, остальные виды происходят из более тёплых климатических регионов: европейские – *A. alpina*, *C. recta*, *C. recta* f. *purpurea*; евроазиатские – *C. viticella*, *C. integrifolia;* центрально-азиатские – *C. glauca*, *C. fargesii*, *C. manschurica*, *C. tangutica*, *C. orientalis*, восточно-азиатские – *C. apiifolia*, *C. brevicaudata*, *C. serratifolia*, *C. paniculata*, *C. heracleifolia*. *C. stans;* юго-восточно-азиатские – *C. gouriana*, *C. hexapetala*; североамериканский – *C. ligusticifolia*. В естественных природных условиях у этих видов вегетационный сезон более продолжительный, а в наших условиях они не успевают вступить в эти фазы. С наступлением отрицательных температур побеги с листвой становятся тёмно-коричневыми и отмирают, при этом листва не опадает.

При обработке полученных данных использованы следующие статистические методы [14]: корреляционный анализ – для оценки связи фенофаз между собой, дисперсионный анализ – для оценки влияния видовых особенностей и погодных условий года вегетации на прохождение фенодат.

Среднемноголетние метеоданные г. Уфы следующие: среднемноголетняя температура воздуха +3,4 °С, средняя температура января -13,5 °С, абсолютный минимум -48,5 °С, безморозный период 144 дня, средняя температура июля +19,5 °С, абсолютный максимум – +40 °С, среднегодовое количество осадков 500–590 мм, из них 350 мм выпадает в тёплый период года. Снежный покров устанавливается в ноябре и лежит 155 дней [15].

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлен корреляционный анализ взаимосвязи фенологических фаз у видовых клематисов, а в таблице 2 – результаты оценки влияния метеоусловий года и видовых особенностей на прохождение фенодат.

Среднемноголетние данные фенологии клематисов представлены в таблице 3. Вегетация клематисов начинается в конце апреля, виды подсекции *Tubulosae* пробуждаются в начале мая. Фазы начала и окончания цветения

Таблица 1 / Table 1

Корреляционный анализ взаимосвязи фенологических фаз
Correlation analysis of interrelation of phenological phases

Фенофазы Phenophases	Начало роста побегов Beginning of growth of sprout	Начало цветения Beginning blossomings	Окончание цветения Termination blossomings	Окончание роста побегов Termination growth shoot	Начало созревания плодов Beginning of maturing fruits	Окончание вегетации Termination vegetations
Раскрытие почек Opening of buds	0,929*	0,471*	0,436*	0,348*	0,364*	0,218
Начало роста побегов Beginning of growth of shoot	1,000	0,492*	0,368*	0,371*	0,235	0,196
Начало цветения Beginning blossomings		1,000	0,852*	0,783*	0,312*	-0,117
Окончание цветения Termination blossomings			1,000	0,768*	0,386*	-0,038
Окончание роста побегов / Termination growth shoot				1,000	-0,072	-0,166
Начало созревания плодов / Beginning of maturing fruits					1,000	-0,074
Окончание вегетации Termination vegetations						1,000

*Примечание: * – значимые величины r (коэффициента корреляции) при p < 0,05.*
*Note: * – significant values of r (correlation coefficient) at p < 0.05.*

Таблица 2 / Table 2

Влияние видовых особенностей и метеоусловий года на прохождение фенологических фаз клематисов
Influence of specific features and meteoconditions of year on passing of phenological phases of clematises

Фенологические фазы Phenological phases	Фактор вида Species factor		Фактор года Factor of year	
	F	*p*	*F*	*p*
Раскрытие почек / Opening of buds	2,96*	0,0025	6,80*	< 0,0001
Начало роста побегов / Beginning of growth of shoot	1,86*	0,0024	5,00*	0,0004
Начало цветения / Beginning blossomings	164,70*	< 0,0001	1,41	0,0236
Окончание цветения / Termination blossomings	206,34*		5,18*	0,0004
Длительность цветения / Blossoming duration	54,74*		4,67*	0,0017
Окончание роста побегов / Termination growth shoot	86,48*		1,32	0,1344
Начало созревания плодов Beginning of maturing fruits	108,87*		1,45	0,1358
Окончание вегетации / Termination of vegetations	32,96*		6,12*	< 0,0001
Длительность вегетации / Vegetation duration	1,44	0,1600	3,56*	0,0017

*Примечание: * – значимые величины при p = 0,05.*
*Note: * – significant values at p = 0.05.*

Таблица 3 / Table 3

Сезонный ритм развития видов рода *Clematis* с 2007 по 2020 годы / Seasonal rhythm of development of species of the genus *Clematis* from 2007 to 2020

№ No.	Таксон / Taxon	Разверзание почек Brearing of buds	Начало роста побегов Beginning of growth of sprout	Начало цветения Beginning blossomings	Окончание цветения Termination blossomings	Окончание роста побегов Termination growth shoot	Начало созревания плодов Beginning of maturing fruits	Окончание вегетации Termination vegetations
1	*Atragene alpina*	18.04–24.04	20.04–26.04	12.05–16.05	30.05–1.06	14.08–19.08	4.08–7.08	21.09–28. 09
2	*A. speciosa*	18.04–25.04	21.04–26.04	12.05–17.05	31.05–3.06	10.08–15.08	5.08–8.08	21.09–28.09
3	*Clematis apiifolia*	19.04–26.04	20.04–27.04	13.08–20.08	28.09–2.10	1.10–7.10*	–	4.10–8.10**
4	*C. brevicaudata*	20.04–26.04	22.04–28.04	7.09–13.09	10.10–14.10	1.10–6.10*	–	12.10–18.10**
5	*C. fargesii*	19.04–26.04	21.04–27.04	22.08–26.08	25.09–29.10	18.09–23.10*	11.10–15.10	3.10–8.10**
6	*C. glauca*	19.04–26.04	22.04–2.05	5.09–10.09	2.10–7.04	1.10–5.10*	–	2.10–7.10**
7	*C. gouriana*	20.04–25.04	22.04–26.04	18.07–26.04	23.09–28.09	14.09–18.09*	17.10–21.10	6.10–10.10**
8	*C. hexapetala*	25.04–29.04	27.04–30.04	26.06–28.06	29.08–5.09	27.08–2.09	6.10–11.10	7.10–10.10
9	*C. heracleifolia*	1.05–6.05	3.05–8.05	6.09–10.09	4.10–12.10*	26.09–3.10*	–	1.10–8.10**
10	*C. integrifolia*	23.04–27.04	24.04–28.04	26.05–30.05	27.07–2.08	14.07–19.08	1.09–7.09	7.10–10.10
11	*C. ispahanica*	29.04–4.05	1.05–5.05	13.08–18.08	6.10–9.10*	6.10–9.10*	–	7.10–12.10**
12	*C. ligusticifolia*	22.04–26.04	25.04-29.04	18.06–22.06	10.09–18.09	10.09–17.09	–	7.10–11.10**
13	*C. manschurica*	23.04–26.04	25.04–28.04	2.06–5.06	12.07–18.07	8.07–11.07	27.08–2.09	6.10–9.10
14	*C. orientalis*	24.04–29.04	26.04–30.04	2.09–9.09	6.10–10.10*	7.10–10.10*	–	8.10–11.10**
15	*C. recta*	23.04–26.04	25.04-29.04	1.06–5.06	11.07–18.07	7.07–11.07	25.08–30.08	5.10–10.10
16	*C. recta* f. *purpurea*	22.04–26.04	24.04–29.04	1.06–5.06	10.07–18.07	8.07–17.07	28.08–3.09	4.10–9.10
17	*C. paniculata*	25.04–28.04	26.04–2.04	22.06–26.06	15.09–20.09	27.08–6.09	23.08–26.08	7.10–11.10
18	*C. serratifolia*	23.04–27.04	29.04–2.05	4.09–8.09	7.10–12.10*	5.10–11.10*	–	9.10–12.10**
19	*C. stans*	2.05–7.05	3.05–8.05	4.09–9.09	4.10–8.10*	4.10–8.10*	–	7.10–12.10**
20	*C. tangutica*	24.04–29.04	26.04–30.04	26.06–29.06	26.09–30.10	22.09–27.09	13.08–17.08	7.10–11.10**
21	*C. viticella*	23.04–27.04	27.04–1.05	13.06–17.06	2.08–8.08	15.07–27.07	21.09–25.09	7.10–11.10**

*Примечание: *– цветки побиты заморозками, **– листва тронута заморозками, собственно листопада не наблюдается, «–» – плодоношение отсутствует.*
*Note: * –the flowers are beaten by frosts, ** –the foliage is touched by frosts, there is no actual leaf fall, "–" – there is no fruiting.*

являются индивидуальным признаком для каждого вида, и если внутри подсекций фенодаты достаточно близки, то между секциями очень разнятся. Плодоношение, как правило, наступает через 2–2,5 месяца после начала цветения. Некоторые виды нашей коллекции зацветают в конце лета – в сентябре, из 21 вида только 11 завязывают полноценные семена. Вегетация у клематисов заканчивается в конце сентября – в начале октября с наступлением первых ночных отрицательных температур.

У клематисов почки раскрываются в конце апреля, в среднем – 24 апреля. В эту фазу первыми вступают виды секции *Atragene* (21 апреля), последними – *C. heracleifolia* (4 мая) и *C. stans* (5 мая), у оставшихся видов почки распускаются в период с 23 по 27 апреля. Корреляционный анализ (табл. 1) выявил достоверную связь начала вегетации с началом роста побегов. Также статистически значима, но в меньшей степени, связь этой фенофазы с началом и концом цветения, началом плодоношения и концом вегетации. Таким образом, раннее начало вегетации и отрастания побегов влечёт за собой более раннее начало и окончание сроков цветения, а также окончания вегетации в целом (и наоборот).

Дисперсионный анализ феноданных выявил достоверную зависимость начала вегетации клематисов от видовых особенностей (F = 2,96; p < 0,002) и ещё более значимую связь с годовыми изменениями метеоусловий (F = 6,80; p < 0,0001) (табл. 2).

У видов клематисов побеги начинают отрастать в среднем 28 апреля (от 21 апреля – у *A. alpina* до 5 мая – у *C. stans*). Выявлена корреляция данной фенофазы с фазами начала вегетации, цветения и окончания роста побегов (табл. 1). Достоверное влияние видовых особенностей и погодных условий года вегетации отмечено в фенофазу начала отрастания побегов (табл. 2).

Виды клематиса начинают цвести в разные сроки. В середине мая зацветают виды секции *Atragene*, в начале июня – травянистые виды секции *Recta*, позже лианы – *C. viticella* и др. *C. gouriana* зацветает в середине июля. Самым поздним зацветанием (в начале сентября) отличаются *C. glauca*, *C. brevicaudata*.

Выявлена корреляционная связь фазы начала цветения с фазами конца цветения, начала роста побегов и плодоношения. По результатам дисперсионного анализа на прохождение данной фазы значимо влияние фактора вида (F = 164,70; p < 0,0001), а связь с фактором года отсутствует. Таким образом, наблюдаемые видовые расхождения по срокам цветения обусловлены генетическими особенностями видов клематисов, связанными с природным ареалом их произрастания, и не зависят от условий конкретного года вегетации.

Длительность цветения растений – одна из ведущих характеристик декоративности [1]. У видов клематиса отмечена значительная изменчивость этого показателя. Наименьший срок цветения отмечен у видов секции *Atragene* (13–28 дней), наибольший – у *C. tangutica* (87–115 дней). *Clematis manschurica*, *C. recta* f. *purpurea* и *C. recta* (травянистые виды) цветут 36–60 дней, *C. paniculata* – до 85 дней, полукустарник *C. integrifolia* – до 111 дней. Цветение *C. gouriana* успевает закончиться до наступления осенних заморозков, страдает цветение только на концах побегов, продолжительность его цветения 64–68 дней.

Лианы *C. apiifolia*, *C. brevicaudata*, *C. fargesii*, *C. glauca*, *C. serratifolia*, *C. ispahanica*, *C. orientalis*, а также полукустарники *C. heracleifolia* и *C. stans* не имеют полноценного периода цветения, они ежегодно вынужденно заканчивают цветение при наступлении заморозков. Длительность цветения этих видов – 33–59 дней.

По данным дисперсионного анализа выявлено значимое влияние фактора вида (F = 54,74; p < 0,0001), и в меньшей степени – фактора года (F = 4,67; p < 0,001) на продолжительность цветения. Общая длительность цветения клематисов коллекции составляет 5 месяцев (с середины мая по начало октября). Продолжительность цветения клематисов в разных климатических зонах по литературным данным также различна: так, например, в г. Ялте цветение разных видов длится от 28 до 111 дней, в Ставрополе – от 28 до 77 дней, в Барнауле – от 24 до 56 дней [16].

Окончание цветения корреляционно связано с фазой начала цветения и фазой плодоношения. По данным дисперсионного анализа эта фаза в большей степени зависит от фактора вида (F = 206,34; p < 0,0001) и менее – от фактора года (F = 5,18; p < 0,0004). Таким образом, на сроки цветения видов клематиса существенно влияют видовые особенности.

Конец роста побегов большинства видов клематисов совпадает с окончанием цветения. Отмечено значительное варьирование продолжительности фазы роста побегов у разных видов клематиса. *Clematis manschurica*, *C. recta*, *C. recta* f. *purpurea* и *C. integrifolia* прекращают рост побегов 8–17 июля, *C. viticella* – 15–27 июля,

C. hexapetala – 2 сентября. Виды секции *Atragene* заканчивают рост побегов в середине августа, *C. paniculata* – 27 августа – 6 сентября. Окончание роста побегов остальных клематисов связано с наступлением первых заморозков, их рост и цветение заканчивается 1–10 октября. Наибольшая продолжительность роста побегов характерна для лиан из секции *Viorna*, подсекций *Orientalis* и *Tanguticae* (165–168 дней), наименьшая – для травянистых видов подсекции *Rectae* (73–114 дней). Окончание роста побегов корреляционно связано с фазами начала вегетации и роста побегов, начала и конца цветения: это прямая взаимосвязь, поскольку практически все побеги являются генеративными. Выявлено достоверное влияние на данную фазу видовых особенностей ($F = 86{,}48$; $p < 0{,}0001$) и отсутствие связи с условиями конкретного года.

Только у 11 видов коллекции наблюдается плодоношение. Первыми созревают плоды у видов секции *Atragene* и *C. tangutica* (в августе), затем – у большинства травянистых клематисов (в сентябре), ещё позже – у лиановидных клематисов. Созревание плодов коррелирует с фазами начала вегетации, начала и конца цветения. Раннее начало вегетации и цветения вида способствует и более раннему плодоношению. Факторный анализ выявил достоверное влияние видовых особенностей ($F = 108{,}87$; $p < 0{,}001$), при этом климатические условия года не оказывают значимого влияния на данную фазу.

Расцвечивание листьев и листопад отмечены только у местного вида *Atragene speciosa* и у европейского *A. alpina* (21–28 сентября). У травянистых многолетников фаза листопада не выражена, для них и лиановидных клематисов фиксируется фаза конца вегетации при отмирании листьев и побегов при первых заморозках. Конец вегетации коррелирует с началом раскрытия почек, роста побегов и концом цветения. Дисперсионный анализ выявил связь длительности вегетации с видовыми особенностями ($F = 32{,}96$; $p < 0{,}001$), и в меньшей степени с метеоусловиями года ($F = 6{,}12$; $p < 0{,}0001$).

Средняя продолжительность периода вегетации у клематисов коллекции изменяется по годам от 158 до 168 дней (в Алтайском крае она составляет 149–167 дней, в Старополье – 190–212 дней, в Крыму – 224–245 дней) [16]. Минимальный период вегетации отмечен у *C. stans* (158 дней), у *C. heracleifolia* и *A. speciosa* он составляет 159 дней, а максимальный – у *C. viticella* (168 дней), у остальных видов он укладывается между этими сроками. Дисперсионный анализ показал, что продолжительность периода вегетации достоверно связана с фактором года ($F = 3{,}56$; $p < 0{,}0017$) и не имеет связи с видовыми особенностями.

Заключение

Таким образом, виды рода *Clematis* L. культивируемые в Башкирском Предуралье, значительно разнятся между собой по фенологическим датам, при этом начальные фазы и окончание вегетации более сближены по фенодатам, а сроки цветения и плодоношения могут расходиться до 3–4 месяцев. Сроки прохождения фенофаз зависят в первую очередь от генетически обусловленных особенностей видов, но достоверная связь выявлена и для метеоусловий. Начало и конец, а также продолжительность вегетации зависят от погодных условий конкретного года вегетации. Вклад видоспецифичности в начале сезонного развития незначителен, с момента начала цветения и до конца вегетации роль биологических особенностей видов существенно возрастает. Последовательность прохождения фенофаз видами сохраняется из года в год. Фазы начала и окончания цветения являются индивидуальным признаком для каждого вида. Плодоношение наступает через 2–2,5 месяца после начала цветения. Из 21 вида только 11 завязывают полноценные семена. Ряд видов не проходит полный цикл сезонного развития: не успевают закончить цветение и не вступают в фазу плодоношения полукустарники *C. heracleifolia* и *C. stans* и лианы центрально- и восточно-азиатского происхождения: *C. apiifolia*, *C. brevicaudata*, *C. fargesii*, *C. glauca*, *C. ispahanica*, *C. orientalis*, *C. serratifolia*. Включённые в исследования клематисы устойчивы к климатическим условиям Предуралья, цветут ежегодно длительное время, декоративны и могут быть рекомендованы в широкую практику фитодизайна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЮУБСИ УФИЦ РАН по теме № АААА-А18-118011990151-7.

References

1. Lapin P.I., Sidneva S.V. Estimate of prospects of an introduction of wood plants according to visual observation // Experience of an introduction of wood plants. Moskva: Nauka, 1973. P. 7–67 (in Russian).

2. Technique of phenological observations in botanical gardens of the USSR. Moskva: Patent, 1975. 27 p. (in Russian).

3. Morita M. Interrelated effects of temperature and photoperiod on the growth and flowering of *Clematis* // J. Japan. Soc. Hortic. 1988. V. 57. No. 3. P. 467–474. doi: 10.2503/jjshs.57.467

4. Toomey M., Leeds E., Chesshire C. An illustrated encyclopedia of *Clematis*. Timber Press, 2001. 426 p.

5. 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: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011

6. Barykina R.P., Chubatova N.V. About types of germination and the first stages of ontogenesis in the genus *Clematis* L. // Vital forms: Structure, ranges and evolution. Moskva: Nauka, 1981. P. 111–140 (in Russian).

7. Chubatova N.V., Churikova O.A. Comparative study on the ontomorphogenesis of some *Clematis* and *Atragene* species (Ranunculaceae) based on the evo-devo concept // Wulfenia. 2016. V. 23. P. 162–174.

8. Tamura M. Morphology, ecology and phylogeny of the Ranunculaceae // VII Sci. Repts. Osaka Univ. 1968. V. 17. No. 1. P. 21–42.

9. Wang W.T., Li L.Q. A new system of classification of the genus *Clematis* (Ranunculaceae) // II Acta Phytotaxonomica Sinica. 2005. V. 43. P. 431–488.

10. Johnson M. The genus *Clematis* L. Sweden: Plantskola AB, 2001. 896 p.

11. Yang W.T., Li L., Xie L. A revision of *Clematis* sect. Atragene (Ranunculaceae) // Journal of Systematics and Evolution. 2009. V. 47. No. 6. P. 552–580. doi: 10.1111/j.1759-6831.2009.00057.x

12. Nasurdinova R.A., Putenikhin V.P. An introduction of clematises in the Bashkir Cis-Urals // Natural Sciences. 2010. No. 2 (31). P. 15–22 (in Russian).

13. Bilalova R.A., Shigapov Z.H. Integrated assessment of prospects of an introduction of clematises in the Bashkir Cis-Urals // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2018. No. 2. P. 36–39 (in Russian).

14. Zaitsev G.N. Mathematical statistics in experimental botany. Moskva: Nauka, 1984. 424 p. (in Russian).

15. Putenikhin V.P., Putenikhina K.V., Shigapov Z.Kh. Siberian cedar in the Bashkir Cis-Ural and in the South Urals: biological and forestry features during introduction. Ufa: Bashkirskaya Entsiklopediya, 2017. 248 p. (in Russian).

16. Chebannaya L.P. Introduction of the genus *Clematis* L. to various soil and climatic conditions // Vestnik APK Stavropolya. 2019. No. 1 (33). P. 100–103 (in Russian).

УДК 595.789(470.13) doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-160-167

Значение особо охраняемых природных территорий в сохранении видового разнообразия булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Papilionidea) Республики Коми

© 2021. А. Г. Татаринов, д. б. н., в. н. с., О. И. Кулакова, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tatarinov.a@ib.komisc.ru, kulakova@ib.komisc.ru

В статье представлены результаты натурной инвентаризации и многолетних мониторинговых наблюдений булавоусых чешуекрылых на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) Республики Коми. Установлено, что здесь обитает 115 представителей надсемейства (около 86% состава региональной фауны). Сделан вывод, что большинство ООПТ Республики Коми федерального и республиканского значения в полной мере выполняют функцию сохранения видового разнообразия, ландшафтно-зональной структуры фауны и пространственно-типологической структуры населения чешуекрылых надсемейства Papilionoidea на северо-востоке Русской равнины и в северных областях Уральской горной страны. Оценка риска исчезновения булавоусых чешуекрылых по критериям Международного союза охраны природы даёт основание заключить, что сеть ООПТ Республики Коми играет важнейшую роль в сохранении генофонда видов, включённых в региональную Красную книгу. Для более эффективного решения этих задач необходима организация на опорных ООПТ и в ключевых местообитаниях долговременных мониторинговых наблюдений за состоянием популяций редких видов и динамикой видового разнообразия булавоусых чешуекрылых.

Ключевые слова: булавоусые чешуекрылые, особо охраняемые природные территории, Красная книга, Республика Коми.

The role of protected areas in the conservation of species diversity of butterflies (Lepidoptera, Papilionidea) in the Komi Republic

© 2021. A. G. Tatarinov ORCID: 0000-0002-9990-395X,
O. I. Kulakova ORCID: 0000-0002-9926-1141,
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: tatarinov.a@ib.komisc.ru, kulakova@ib.komisc.ru

The overview of the results of a full-scale inventory and long-term monitoring observations of the occurrence and abundance of butterflies in Specially Protected Natural Areas of the Komi Republic is presented in this paper. It has been established that the republican network of protected areas includes habitats of 115 representatives of the superfamily (about 86% of the composition of the regional fauna). It is concluded that most of the protected areas of the Komi Republic of federal and republican significance are fully performing the function of preserving species diversity, the landscape-zonal structure of the fauna and the spatial-typological structure of the Lepidoptera population of the Papilionoidea superfamily in the northeast of the Russian Plain and in the northern regions of the Ural Mountains. The IUCN risk assessment of extinction of the Lepidoptera suggests that the network of protected areas of the Komi Republic plays a crucial role in the conservation of the gene pool of species included in the regional Red Book. To meet these challenges, it is necessary to organize monitoring observations of the state of populations of the rare species and the dynamics of the butterflies' species diversity in supported protected areas and in key habitats.

Keywords: Butterflies, protected natural areas, Red Data Book, Komi Republic.

В настоящее время общепризнано, что одним из наиболее эффективных способов сохранения естественного биоразнообразия и его отдельных компонентов, природных сообществ и ландшафтов является создание системы особо охраняемых природных территорий (ООПТ). В Республике Коми функционируют более 240 природных заказников, памятников природы, природный биосферный заповедник, два национальных парка, общей площадью около 5,5 млн га, где ограничена хозяйственная деятельность и установлены особые режимы охраны и использования типичных и уникальных экосистем, редких видов растений, грибов и животных. Для повышения эффективности охраны и управления ООПТ большое значение имеют оценки состояния и динамики численности представителей животного и растительного мира, полученные на основе их натурной инвентаризации [1].

Булавоусые, или дневные чешуекрылые (надсемейство Papilionoidea) выполняют важную биоценотическую функцию опылителей цветковых растений и объекта питания животных-энтомофагов в большинстве типов наземных природных сообществ от экваториальных лесов до арктических и субантарктических широт. Быстрая реакция видов на изменение условий окружающей среды колебанием видового состава, структуры населения и численности популяций определяет их высокие биоиндикационные свойства и возможность использования в экологическом мониторинге. Сведения о видовом составе, ландшафтно-биотопическом распределении, фенологии и трофических связях булавоусых чешуекрылых на ООПТ, где по определению должна поддерживаться естественная структура и динамика биогеоценозов, могут служить в качестве эталона при оценке состояния этой таксономической группы насекомых и других компонентов биологического разнообразия на территориях, испытывающих ту или иную степень антропогенной нагрузки.

Цель данной статьи – оценить эффективность сети особо охраняемых природных территорий Республики Коми для сохранения фауны, пространственно-типологической структуры населения и подержания численности краснокнижных видов булавоусых чешуекрылых.

Материал и методика исследований

Полевые работы, послужившие основой для данной статьи, проводились авторами в 1992–2020 гг. В статье представлены материалы натурной инвентаризации булавоусых чешуекрылых 25 наиболее полно обследованных ООПТ различного профиля. На 20 из них с целью определения эффективности выполнения республиканской системой ООПТ функций сохранения численности популяций булавоусых чешуекрылых, включённых в Красную книгу Республики Коми [2] были оценены риски исчезновения видов по качественным и количественным критериям Международного союза охраны природы (МСОП) версии 3.1. 2001 г. [3]. Это: 1 – национальный природный парк «Югыд ва» с буферной зоной, 2 – Печоро-Илычский биосферный государственный заповедник с буферной зоной, 3 – комплексный заказник (КЗ) «Оченырд», 4 – территория, прилегающая к водному памятнику природы «Водопад на реке Хальмер-Ю» и геологическому памятнику природы «Пембой», 5 – КЗ «Хребтовый», 6 – территория планируемого КЗ «Елецкий», 7 – КЗ «Большая Лагорта», 8 – болотный заказник «Океан», 9 – КЗ «Пижемский», 10 – КЗ «Удорский», 11 – КЗ «Белая Кедва», 12 – КЗ «Чутьинский», 13 – КЗ «Седьюсский», 14 – КЗ «Вычегда», 15 – КЗ «Немский», 16 – КЗ«Лымва», 17 – КЗ «Белоярский» и болотный заказник «Габенюр», 18 – КЗ «Маджский», 19 – КЗ «Важъелью», 20 – ботанический заказник «Комский».

Для достижения поставленной цели данная выборка может считаться репрезентативной, так как включает природные территории с различным географическим положением и таким образом охватывает весь спектр ландшафтно-климатических условий Республики Коми. Подробные физико-географические сведения о выбранных ООПТ с описанием основных компонентов биоразнообразия можно найти в монографии «Кадастр особо охраняемых природных территорий Республики Коми» [1] (за исключением полярно-уральских КЗ «Оченырд» и «Большая Лагорта», образованных в 2019 г., а также территории планируемого КЗ «Елецкий»). Большинство выбранных природных объектов входит в перечень опорных ООПТ, на которых осуществляется регулярный мониторинг видового разнообразия и численности популяций редких и исчезающих видов растений, грибов и животных. Инвентаризация видового состава и выявление структуры населения булавоусых чешуекрылых охраняемых территорий осуществлялись путём визуальных количественных учётов имаго на

трансектах [2, 3]. Исследования на каждой из рассматриваемых ООПТ велись в течение всего вегетационного периода и/или нескольких полевых сезонов, что позволяет уверенно утверждать, что видовой состав, пространственно-типологическая структура местного населения булавоусых чешуекрылых выявлены практически полностью.

С целью определения эффективности выполнения региональной системой ООПТ функций сохранения численности популяций булавоусых чешуекрылых, включённых в Красную книгу Республики Коми [4], были оценены риски исчезновения видов по качественным и количественным критериям МСОП версии 3.1. 2001 г. [5].

Результаты и обсуждение

На территории Республики Коми к 2020 г. было зарегистрировано 133 вида булавоусых чешуекрылых из шести семейств. На характеризуемых в статье ООПТ в общей сложности обнаружено 115 видов, это около 86% состава региональной фауны надсемейства. Результаты натурной инвентаризации лепидоптерофауны большей частью были опубликованы [1, 6–9]. Как показали полевые наблюдения, около 100 видов являются коренными обитателями охраняемых территорий, здесь у них установлены независимые или зависимые, но многолетние структурно сложившиеся популяционные группировки. Остальные являются регулярными сезонными мигрантами, ксенобионтами или региональными супернеобионтами, характер обитания которых в настоящее время не ясен.

Ведущая роль в сохранении естественного видового разнообразия булавоусых чешуекрылых республики и в целом северо-восточной Европы принадлежит, безусловно, Печоро-Илычскому государственному природному биосферному заповеднику и национальному парку «Югыд ва». В общей сложности на этих ООПТ зарегистрировано 106 видов Papilionoidea: с учётом последних таксономических изменений 97 видов в заповеднике и 81 вид – в национальном парке. Таким образом, природоохранный статус данных территорий обеспечивает сохранение естественной структуры и динамики популяций и топических группировок почти 80% видов республиканской фауны булавоусых чешуекрылых. Тем не менее, угрозы состоянию видового разнообразия Papilionoidea на данных ООПТ остаются. Беспокойство вызывает бассейн р. Кожим на севере национального парка «Югыд ва», где располагаются зоны хозяйственного назначения, рекреации и экологического туризма и поэтому сохраняется антропогенная нагрузка на природные ландшафты и сообщества. Данный район Приполярного Урала является важным биогеографическим рубежом между гипоарктической и бореальной фауной и флорой, в том числе и для булавоусых чешуекрылых. В связи с этим пристального внимания требуют местные популяции горных и тундровых видов, находящиеся на южных границах своих ареалов, а также представители «сибирской» плеяды, у которых по Уралу и крайнему северо-востоку Русской равнины проходят западные границы распространения. Ландшафтная и региональная активность данных видов здесь снижается по естественным эколого-географическим и историческим причинам, поэтому они очень уязвимы даже в условиях ограниченного воздействия антропогенных факторов. Это относится в первую очередь к голубянкам *Agriades glandon aquilo* (Bsd.), *Polyommatus eros taimyrensis* Korsh., перламутровке *Issoria eugenia* (Ev.), шашечнице *Euphydryas ichnea* (Bsd.), сатириде *Oeneis magna* Gr., толстоголовке *Pyrgus andromedae* (Wall.). В третьей редакции Красной книги Республики Коми [2] они были включены в списки охраняемых видов и нуждающихся в особом внимании к состоянию в природной среде и рекомендованных для бионадзора.

Ведущая роль Печоро-Илычского заповедника и национального парка «Югыд ва» в сохранении видового разнообразия и численности популяций редких видов булавоусых чешуекрылых Республики Коми очевидна, но необходимо отметить, что данные ООПТ практически полностью располагаются в пределах Уральской горной страны. Ландшафтно-зональное распределение и пространственно-типологическая структура населения Papilionoidea на северо-востоке Русской равнины имеют определённые отличия от Урала. Именно в равнинной части Республики Коми в настоящее время велики площади антропогенно трансформированных природных ландшафтов и сообществ, а хозяйственно-рекреационная нагрузка на них постоянно возрастает. В этих условиях сохранение естественного таёжного и тундрового разнообразия видов булавоусых чешуекрылых северо-востока Русской равнины возможно лишь в территориальной системе государственных природных заказников республиканского значения, прежде всего,

комплексных (ландшафтных) и болотных, а также ботанических, луговых и лесных. На этих профильных ООПТ обитают популяции почти 90% коренных видов булавоусых чешуекрылых региональной равнинной фауны.

Среди зональных фаун наиболее защищёнными выглядят видовые комплексы Papilionoidea средней и северной тайги. В данных подзонах растительности Печорской низменности, Среднего и Южного Тимана, Западного Притиманья и Северных Увалов располагаются малонарушенные охраняемые территории с высоким уровнем разнообразия видов и топических группировок булавоусых чешуекрылых. Это КЗ «Пижемский» (104,7 тыс. га, 38 видов), «Удорский» (242 тыс. га, 47 видов), «Белая Кедва» (51,5 тыс. га, 46 видов), «Седьюсский» (10,5 тыс. га, 68 видов), «Маджский» (22 тыс. га, 59 видов), «Лымва» (25 тыс. га, 51 вид), «Вычегда» (33,6 тыс. га, 50 видов), «Немский» (52 тыс. га, 59 видов), «Сэбысь» (171,5 тыс. га, 47 видов), «Вишерский» (10 тыс. га, 38 видов), «Верхне-Локчимский» (42,4 тыс. га, 44 вида), болотные «Тыбьюнюр» (60 тыс. га, 31 вид), «Кельтманское» (18,8 тыс. га, 45 видов).

Часть охраняемых природных территорий, расположенных вблизи населённых пунктов, регулярно испытывают нарушения охранного режима (вытаптывание местообитаний людьми, загрязнение бытовыми отходами растительно-почвенного покрова, браконьерские рубки деревьев, нерегламентированное движение транспортных средств и т. п.), что негативно отражается на видовом составе и структуре местного населения булавоусых чешуекрылых. Подобные явления выявлены нами в ходе многолетних наблюдений на территории богатых видами Papilionoidea КЗ «Чутьинский» (5,9 тыс. га, 61 вид), «Важъелью» (1,6 тыс. га, 72 вида). Комплексный заказник «Белоярский» (400 га) и примыкающий к нему болотный заказник «Габенюр» (1,2 тыс. га), несмотря на относительно небольшую общую площадь, являются самыми богатыми видами булавоусых чешуекрылых в республике (74 вида). Это объясняется высоким разнообразием и мозаичностью местообитаний, а также многолетней историей изучения местной лепидоптерофауны. К сожалению, в настоящее время природные сообщества заказников испытывают достаточно сильную антропогенную нагрузку из-за нерегламентированных сенокосов и сбора лесных дикоросов. На грани исчезновения в болотном заказнике «Габенюр» оказался уникальный биотопический комплекс гипоарктобореальных и северно-бореальных видов, включающий желтушку *Colias palaeno* (L.), перламутровок *Boloria aquilonaris* (Stich.), *Clossiana eunomia* (Esp.), *C. frejia* (Thnb.), *C. frigga* (Thnb.), сатирид *Coenonympha tullia* (Müll.), *Erebia embla* (Thnb.), *Oeneis jutta* (Hbn.). Основным фактором, повлекшим резкое снижение численности популяционных изолятов данных видов, несомненно, является интенсивное вытаптывание почвенно-растительного покрова и беспокойство бабочек и гусениц в период сбора людьми ягод и грибов.

Учитывая сильную заболоченность крайнесеверной тайги, основную роль в сохранении характерной структуры населения булавоусых чешуекрылых природных сообществ данной подзоны растительности играют болотные заказники и в первую очередь один из крупнейших в Европе болотный заказник «Океан» (179 тыс. га, 43 вида), а также заказник «Усинский комплексный» (138,3 тыс. га, 29 видов), территория которого также практически полностью занята озёрно-болотными экосистемами. Здесь представлены и сохраняются топические группировки видов Papilionoidea, в которых лидирующие позиции по численности и встречаемости занимают представители гипоарктического ландшафтного комплекса.

Подзона южной тундры в Республике Коми располагается в основном в пределах Полярного Приуралья и Урала, поэтому региональная система ООПТ обеспечивает, прежде всего, сохранение субарктических видовых группировок Papilionoidea уральского облика, в составе которых велик удельный вес арктомонтанных и монтанных видов. Ведущая роль в сохранении этого разнообразия видов принадлежит КЗ «Хребтовый» (4 тыс. га, 38 видов) и новообразованному «Оченырд» (3,2 тыс. га, 41 вид). Высокий уровень видового богатства булавоусых чешуекрылых (43 вида) наблюдается на территориях, прилегающих к водному памятнику природы «Водопад на р. Хальмер-Ю» и геологическому памятнику природы «Пембой». К сожалению, они частично или полностью входят в состав участков, лицензированных для поиска, разведки и добычи углеводородного сырья, поэтому можно ожидать, что естественная пространственно-типологическая структура населения Papilionoidea со временем здесь будет утрачена.

Одна из самых богатых (62 вида, из них 54 коренных) локальных фаун булавоусых чешуекрылых Полярного Урала находится

Таблица / Table

Категории статуса редкости и оценка угроз численности по критериям МСОП на особо охраняемых территории булавоусых чешуекрылых, включённых в Красную книгу Республики Коми
Categories of rarity status and assessment of population threats according to IUCN criteria in specially protected areas of Butterflies included in the Red Data Book of the Komi Republic

Название вида Species name	КСР RSC	ООПТ, категория редкости МСОП / Protected Areas, rarity category IUCN																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Papilio machaon L.	bs	LC	LC	LC	LC	LC	LC	DD	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC
Parnassius phoebus (F.)	3	LC	LC	VU	VU	DD	VU	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
P. mnemosyne (L.)	2	–	LC	–	–	–	–	–	–	LC	LC	LC	NT	LC	–	–	–	DD	–	DD	LC
Colias hecla Lfbv.	bs	DD	–	LC	DD	LC	NT	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Thecla betulae (L.)	bs	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	–
Fixsenia pruni (L.)	bs	–	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	LC	–	LC	–	LC	–	LC	DD
Lycaena phlaeas (L.)	bs	DD	LC	–	–	–	DD	–	–	–	–	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–
Cupido minimus (Fsl.)	bs	NT	LC	DD	DD	DD	DD	–	–	LC	LC	–	DD	LC	–	–	–	–	–	DD	–
C. alcetas (Hoff.)	bs	–	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	NT	LC	–	–	–	–	LC	–	–
Aricia nicias (Meig.)	bs	–	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	LC	NT	LC	–	–	–	LC	–	DD	–
Agriades glandon aquilo (Bsd.)	3	NT	–	DD	NT	DD	VU	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Polyommatus eros taimyrensis Korsh.	3	NT	–	DD	–	DD	NT	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Limenitis populi (L.)	bs	DD	LC	–	–	–	–	–	–	–	DD	–	LC	LC	–	LC	LC	LC	LC	LC	LC
Neptis rivularis (Scop.)	bs	–	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	LC	–	–	–	LC	–	DD	–
Euphydryas ichnea (Bsd.)	bs	NT	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	LC	–	–	–	–	–	–	–
E. iduna (Dalm.)	3	–	–	DD	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Argynnis paphia (L.)	bs	LC	LC	–	–	–	–	–	LC	–	–		LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC
Issoria eugenia (Ev.)	3	NT	DD	LC	VU	LC	NT	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Clossiana chariclea (Schn.)	bs	–	–	LC	NT	DD	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C. dia (L.)	bs	–	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C. improba (Butl.)	bs	–	–	LC	NT	DD	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C. polaris (Bsd.)	bs	–	–	LC	NT	DD	NT	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C. selenis (Ev.)	bs	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C. tritonia (B b.)	3	–	–	–	–	–	NE	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lopinga deidamia (Ev.)	bs	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pararge aegeria (L.)	bs	–	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	–	LC	DD	LC	–
Lasiommata maera (L.)	bs	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	–	DD	–
Coenonympha hero (L.)	bs	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	–	–	DD

Название вида Species name	КСР RSC	ООПТ, категория редкости МСОП / Protected Areas, rarity category IUCN																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Erebia jeniseiensis Tryb.	bs	–	–	–	–	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E. discoidalis (Krb.)	bs	NT	–	–	NT	DD	NT	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E. fasciata Butl.	bs	DD	–	LC	LC	LC	LC	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Oeneis magna Gr.	bs	NT	–	–	–	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Oe. polixenes (F.)	bs	–	–	–	–	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pyrgus alveus (Hbn.)	bs	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	DD	–	DD	–
P. andromedae (Wall.)	3	NT	–	–	–	–	DD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pyrgus centaureae (Ramb.)	bs	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Всего охраняемых видов Total protected species		5	3	4	3	4	5	3	–	1	1	1	1	1	–	–	–	1	–	1	1
Всего бионадзорных видов Total bio-surveillance species		12	18	9	10	9	19	4	2	2	3	2	9	9	2	5	3	10	5	11	5

Примечания: КСР – категории статуса редкости вида в Красной книге Республики Коми [1]: 2 – сокращающиеся в численности, таксоны и популяции с неуклонно сокращающейся численностью, которые при дальнейшем воздействии факторов, снижающих численность, могут в короткие сроки попасть в категорию находящихся под угрозой исчезновения; 3 – редкие, таксоны и популяции, которые имеют малую численность и распространены на ограниченной территории или спорадически распространены на значительных территориях; bs – таксоны и популяции, нуждающиеся в особом внимании к их состоянию в природной среде и рекомендованные для бионадзора. Категории редкости объектов (видов, подвидов, популяций) по версии 3.1 МСОП 2001 г.: EN (Endangered) – находящиеся в опасном состоянии; VU (Vulnerable) – уязвимые; NT (Near Threatened) – находящиеся в состоянии, близком к угрожаемому; LC (Least Concern) – вызывающие наименьшие опасения; DD (Data Deficient) – недостаточно данных для оценки; NE (Not Evaluated) – не оценённые по критериям.

Notes: RSC – categories of the rarity status of the species in the Red Book of the Komi Republic [1]: 2 – declining populations, taxa and populations with steadily decreasing numbers, which, if further affected by factors that reduce the number, can quickly fall into the category of endangered species; 3 – rare, taxa and populations that are small in number and distributed over a limited area or sporadically distributed over large areas; bs – taxa and populations that need special attention to their state in the natural environment and are recommended for biosupervision. Object rarity categories (species, subspecies and populations) IUCN version 3.1 2001 г: EN (Endangered); VU (Vulnerable); NT (Near Threatened); LC (Least Concern); DD (Data Deficient); NE (Not Evaluated).

в междуречье Соби и Ельца. К настоящему времени здесь сложился целый комплекс негативных внешних воздействий, которые выступают в роли лимитирующих факторов численности и встречаемости видов: строительство новых транспортных магистралей, интенсивный проезд гусеничной техники в бесснежный период, вытаптывание местообитаний чешуекрылых на нерегулируемых туристических маршрутах и стоянках, бесконтрольный коммерческий вылов имаго. Очевидным решением описанных проблем является создание в междуречье Соби и Ельца государственного КЗ республиканского значения «Елецкий». Эта необходимость обосновывается также тем, что в данном районе Полярного Урала постоянно обитает 18 охраняемых и бионадзорных видов насекомых, среди которых 13 видов – булавоусые чешуекрылые [4].

При современном уровне трансформации природных сообществ и ландшафтов, перспективах хозяйственного развития Республики Коми поддержание численности популяций большинства видов, включённых в региональную Красную книгу, возможно только посредством охраняемых природных территорий. Однако надо отметить, что число обитающих на ООПТ краснокнижных видов заметно отличается (табл.). Объясняется это следующими причинами. Большинство подлежащих охране и бионадзору булавоусых чешуекрылых являются представителями гипоарктической и горной уральской фауны, поэтому ведущая роль в поддержании их численности принадлежит заказникам и памятникам природы Полярного Урала и Предуралья, национальному парку «Югыд ва» и Печоро-Илычскому заповеднику. В равнинных районах республики ООПТ имеют значение, прежде всего, для сохранения исторически сложившегося разнообразия видов, типичных и уникальных таксоценов Papilionoidea таёжной зоны. Другая причина заключается в том, что большинство охраняемых природных территорий в предшествующие периоды времени создавалось без учёта материалов по булавоусым чешуекрылым и другим группам насекомых, поэтому популяции редких видов часто не попадали в их границы.

Оценка риска исчезновения видовых популяций по критериям МСОП даёт основание считать, что республиканская сеть ООПТ имеет определяющее значение для поддержания численности краснокнижных парусников *Parnassius phoebus* (F.), *P. mnemosyne* (L.). Крупнейшие уральские метапопуляции этих видов охраняются на территории национального парка «Югыд ва», Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника и его буферной зоны. Практически все локальные популяции *P. mnemosyne* (L.), выявленные в Западном Притиманье, на Среднем и Южном Тимане, Северных Увалах также находятся на территории природных заказников республиканского значения. У охраняемой перламутровки *Issoria eugenia* (Ev.) благодаря исследованиям последних лет на крайнем северо-востоке Республики Коми была установлена крупная метапопуляция, большая часть особей которой обитает на полярноуральских ООПТ. Это даёт основание оценить её состояние как вызывающее наименьшие опасения (LC). Однако устойчивое сокращение численности вида в других районах, в том числе и на севере национального парка «Югыд ва», пока не позволяет ставить вопрос о смене его статуса в Красной книге Республики Коми. О существующих, в том числе и на охраняемых природных территориях, угрозах численности краснокнижных голубянок *Agriades glandon aquilo* (Bsd.), *Polyommatus eros taimyrensis* Korsh., толстоголовки *P. andromedae* (Wall.) было сказано выше. Вызывает серьёзное беспокойство состояние единственной выявленной на территории Республики Коми локальной популяции перламутровки *Clossiana tritonia* (Böb.). Очевидным решением проблемы её сохранения является создание КЗ республиканского значения «Елецкий».

Состояние на ООПТ Республики Коми популяций большинства булавоусых чешуекрылых, рекомендованных для бионадзора, в целом опасений не вызывает. Низкая численность и встречаемость многих из них обусловлена естественными причинами (условия климата, периферия ареалов и т. п.). Тем не менее, приходится признать, что материалов натурной инвентаризации недостаточно для определения эффективности ООПТ в поддержании численности этих видов. Связано это, прежде всего, с труднодоступностью природных объектов и начальным этапом мониторинговых работ.

Заключение

На основании обобщения материалов натурной инвентаризации видового состава и наблюдений за встречаемостью и численностью видов булавоусых чешуекрылых можно заключить, что большинство ООПТ Республики Коми федерального и республиканского значе-

ния в целом выполняют функцию сохранения видового разнообразия Papilionoidea на северо-востоке Русской равнины и в северных областях Уральской горной страны. Численность популяций большинства видов, требующих в регионе специальных мер охраны и бионадзора, поддерживается именно на охраняемых природных территориях. Одними из важнейших задач ближайшего десятилетия является выполнение в полном объёме запланированных мероприятий по ведению Красной книги Республики Коми и организация на опорных ООПТ и в ключевых местообитаниях долговременных наблюдений за динамикой видового разнообразия булавоусых чешуекрылых.

Требуют дополнительного внимания проблемы сохранения видовых комплексов булавоусых чешуекрылых полосы лесотундры и подзоны южной тайги. Природные объекты этих зональных выделов не в полной мере представлены в республиканской системе ООПТ. Данный пробел в настоящее время во многом восполнен организацией национального парка федерального значения «Койгородский» на юге республики. Дополнительные поисковые полевые работы проведены в лесотундровой полосе Русской равнины и Полярного Предуралья. Здесь запланирована организация нескольких комплексных заказников республиканского значения. Это должно значительно повысить ландшафтную репрезентативность системы охраняемых территорий республики и, в частности, обеспечить сохранение уникальных видовых комплексов булавоусых чешуекрылых, исторически сформировавшихся на рубежах суббореальной, бореальной и гипоарктической фаун.

Статья подготовлена в рамках государственного задания по теме «Распространение, систематика и пространственная организация фауны и населения наземных и водных животных таёжных и тундровых ландшафтов и экосистем европейского Северо-Востока России», № гос. регистрации АААА-А17-117112850235-2 (2018–2021 гг.).

References

1. Cadaster of specially protected natural territories of the Komi Republic / Eds. S.V. Degteva, V.P. Ponomarev. Syktyvkar, 2014. 428 p. (in Russian).

2. Yamamoto M. Notes on the methods of belt transect census of butterflies // J. Fac. Sci. Hoccaido Univ. Ser. VI. Zool. 1975. V. 20. No. 1. P. 53–58.

3. Pollard E., Yates T.J. Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.

4. Red Book of the Komi Republic. 3rd edition, official / Ed. S.V. Degteva. Syktyvkar: Komi republic printing house, 2019. 768 p. (in Russian).

5. IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1, second ed. Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 2012. 32 p.

6. Tatarinov A.G., Kulakova O.I. Macrolepidoptera of the Pechora-Ilych Reserve and the National park "Yugyd va". Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2018. 156 p. (in Russian). doi: 10.31140/book-2018-01

7. Tatarinov A.G., Kulakova O.I., Kolesnikova A.A. Invertebrates fauna / Biodiversity of especially protected natural territories of the Komi Republic. V. 5: Specially protected natural areas of Pretymania (Ukhta and Sosnogorsk districts). Syktyvkar: Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. P. 52–58 (in Russian).

8. Tatarinov A.G., Kulakova O.I. Butterflies and Dragonflies // Biological diversity of especially protected natural territories of the Komi Republic. V. 5. Natural complex reserve "Chrebtovyi". Syktyvkar: Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. P. 78–83 (in Russian).

9. Zinovieva A.N., Kulakova O.I., Pestov S.V., Tatarinov A. G., Filippov N.I. Animal world. Entomofauna // Biological diversity of specially protected natural territories of the Komi Republic. 4: Protected natural complexes of Timan (part III). Complex nature reserve "Pizhemsky". Syktyvkar, 2011. P. 85–101 (in Russian).

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-168-171

New environmentally friendly microbiological composition for comprehensive protection of wheat from diseases and pests

© 2021. R. M. Khairullin[1] ORCID: 0000-0001-8613-0786, R. Sh. Irgalina[2] ORCID: 0000-0002-4299-8863, N. A. Urazbakhtina[2] ORCID: 0000-0002-8195-4281, I. V. Maksimov[1] ORCID: 0000-0002-5707-3265,
[1]Institute of Biochemistry and Genetics of Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Letter 1E, 71, Prospekt Oktyabrya, Ufa, Russia, 450054,
[2]Bashkir State Agrarian University,
Build. 34, 50 Let Oktyabrya St., Ufa, Russia, 450001,
e-mail: krm62@mail.ru

The multifunctional biopreparation (MB) containing bacterial cells of *Bacillus subtil*is 26D (ARRIAM 128), *Bacillus thuringiensis* ssp. *thuringiensis* (VKPM B-5689) and *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* (VKPM B-6066) for increasing crop yields and protect them from pests and diseases was developed. Assessment of protective and growth-stimulating properties of MB in the field revealed that two-time treatment of spring wheat plants Vatan variety with the 2 kg/ha MB allowed obtaining the maximum increase of harvest. It amounted to 0.48 ton/ha of grain in comparison with the control (water treatment). The efficiency of MB application for protection of wheat against aphids was 100%. The use of a single and double concentration of mixture of biofungicide Phytosporin-M (*B. subtilis* 26D, $2 \cdot 10^9$ CFU/g, 1 kg/ha and 2 kg/ha) and bioinsecticide Bitoxybacillin (1 kg/ha and 2 kg/ha) did not allow to obtain an effect equal to MB influence. The developed environmentally safe microbiological consortium was recommended as the basis of biopreparation with multifunctional activity.

Keywords: microbiological preparation, *Bacillus* sp., wheat protection.

УДК 632.937.15:579.64

Новая экологически безопасная микробиологическая композиция для комплексной защиты пшеницы от болезней и вредителей

© 2021. Р. М. Хайруллин[1], д. б. н., г. н. с., Р. Ш. Иргалина[2], к. б. н., доцент, Н. А. Уразбахтина[2], к. б. н., с. н. с., И. В. Максимов[1], д. б. н., зав. лабораторией,
[1]Институт биохимии и генетики Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук,
450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, д. 71, литера 1Е,
[2]Башкирский государственный аграрный университет,
450001, Россия, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, д. 34,
e-mail: krm62@mail.ru

Испытана эффективность применения нового многофункционального биопрепарата, содержащего клетки бактерий *Bacillus subtilis* 26Д (ВНИИСХМ 128), *Bacillus thuringiensis* ssp. *thuringiensis* (ВКПМ B-5689) и *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* (ВКПМ B-6066), для защиты посевов пшеницы от насекомых-вредителей, болезней и увеличения урожайности зерна. Двукратная обработка яровой пшеницы сорта Ватан биопрепаратом позволила получить в эксперименте максимальную прибавку урожайности зерна в 0,48 т/га в сравнении с контролем (обработка водой). Эффективность защиты от злаковой тли составила 100%. Многофункциональный биопрепарат рекомендован в качестве основы экологически безопасного биопестицида для применения на посевах пшеницы.

Ключевые слова: микробиологический препарат, *Bacillus* sp., защита пшеницы.

In order to reduce the frequency of treatments of crops with chemical plant protection products, some companies have developed a number of chemical combined agents (insectofungicides), for example, such as Celest Top (Syngenta), Prestige, Emesto Quantum (Bayer) and others. Their effectiveness is quite high, but the problems of the formation of resistance of harmful organisms, the accumulation of chemicals in the environment, and toxicity to animals and humans remain [1]. Therefore, it is of interest to develop safe biological plant protection products with multifunctional activity, combining simultaneously fungicidal, insecticidal and plant growth stimulating properties. The presence of combined activity in biological products can be achieved through the creation of multicomponent formulations, including several strains of microorganisms with various economically useful properties. Currently, there are known microbial preparations with fungicidal activity based on the bacteria *Bacillus subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, for example, Fitosporin-M (BashInkom LLC), Alirin-B (Agrobiotechnology LLC), Orgamika S (Bionovatic LLC) [2], as well as biological products for the control of insect pests based on *B. thuringiensis* (*B. th.*), for example, Bitoxibacillin (Sibbiopharm LLC), containing spores and cells of the *B. th.* ssp. *thuringiensis* 98 ($BtH_1 98$) and δ-exotoxin [3]. The presence of different economically useful properties in bacteria of the same genus *Bacillus*, their ability to sporulate and produce dry preparations on their basis, makes it possible to classify bacteria of this genus as promising for use as a basis for polyfunctional plant protection products. Confirmation is, for example, patent EP2061326A1 [4], in which a consortium of strains of wild, mutant or genetically modified forms of bacteria *Bacillus* spp. is used to protect plants from various harmful organisms.

Treatment of plants with biological products based on rhizosphere or phylloplanic bacteria leads to their gradual elimination due to the competitive pressure of native microorganisms. One of the solutions to exclude their competitive pressure can be the use of endophytic bacteria that can live inside plants, not only without harming them, but also protecting the host. It is known that some "fungicidal" strains of bacteria *Bacillus* spp., as well as "insecticidal" *B. th.* [5, 6] have endophytic properties. However, the number of plant protection products based on endophytes is limited. In this regard, we have proposed a multifunctional preparation containing endophytic strains of bacteria of the genus *Bacillus*. The results of evaluating the effectiveness of its use for protecting wheat from pests and diseases are given in this work.

The aim of the work is to evaluate the effectiveness of using a new preparation containing cells *Bacillus subtilis* 26D (ARRIAM 128), *Bacillus thuringiensis* ssp. *thuringiensis* (VKPM B-5689) and *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* (VKPM B-6066) for yield increase and protection of wheat from insect pests and diseases.

Research methods

Strains of bacteria *B. th.* ssp. *thuringiensis* that are not pathogenic for humans and animals (number in the VKPM collection V-5689) and *B. th.* ssp. *kurstaki* (VKPM V-6066), as well as *B. subtilis* 26D (collection of ARRIAM, No. 128), were provided by BashInkom LLC. Bacterial preparations were obtained separately by cultivating them in liquid L-medium according to Miller (DIFCO) until sporulation. Then the spores were separated from the medium by centrifugation, mixed with a starch-sucrose mixture (1 : 1 by weight) and dried in an air flow in a laminar-flow cabinet. The preparations containing at least 4 billion colony-forming units of bacteria (CFU) in 1 g of each powder have been obtained. The powders were mixed in such a ratio by weight so that 1 g of the mixture contained $2 \cdot 10^9$ CFU of *B. subtilis* 26D bacteria, $1 \cdot 10^9$ CFU of *B. th.* ssp. *thuringiensis* and $1 \cdot 10^9$ CFU of *B. th.* ssp. *kurstaki*.

To compare the effectiveness of MB, a mixture of dry commercial preparations of the biofungicide Fitosporin-M (*B. subtilis* 26D, $2 \cdot 10^9$ CFU/g, BashInkom LLC) and the insecticide Bitoxibacillin (BTB) (*B. th.* ssp. *thuringiensis* $H_1 98$, $20 \cdot 10^9$ CFU/g, Sibbiopharm LLC) has been prepared.

The effectiveness of the preparations was assessed in the fields of the educational and scientific center of the Bashkir State Agrarian University according to the methods of [7] and the All-Russian Research Institute of Plant Protection of the Russian Academy of Agricultural Sciences [8]. Repetition was three times, plot area 50 m^2.

The biopreparations were suspended in water, the crops were treated with a Zhuk knapsack sprayer at the rate of 300 L of working liquid per hectare (Table 1).

The results were processed using the Statistica 12.0 software. The tables show the mean values of biological repeats and their standard deviations or the values of the least significant difference with the control at $p = 0.05$.

Table 1

Scheme of plants treatment

Variants of treatment	Preparations doses for one treatment, kg/ha	Tillering	Full blossom
1	Control, water 300 L/ha	+	+
2	Phytosporin, 1 kg/ha + BTB 1 kg/ha	+	–
3		+	+
4	MB 2 kg/ha	+	–
5		+	+

Note: "+" plants treated; "–" plants no treated.

Results and discussion

The manifestation of physiological activity by endophytes, being inside plant tissues, makes it possible to reduce the number of plant treatments due to long-term effective mutualism of the microorganism and the host. At the same time, the microsymbiont is protected from the influence of the environment by plant tissues, and its presence in the agroecosystem is limited by the host (9). Therefore, the use of preparations based on endophytes increases the likelihood of the effectiveness of plant protection from harmful organisms.

Treatment of wheat crops in the tillering phase with a mixture of commercial preparations slightly stimulated plant growth up to the earing phase. The effect of the MP in variant 4 was manifested in the stimulation of plant growth in the heading phase, and in variant 5 – in the phase of grain waxy ripeness.

The use of biological products decreased the prevalence of powdery mildew, mixed root rot and septoria blight, as well as plant damage by leaf rust. Double treatment of crops with a mixture of commercial preparations, in comparison with MB, was more effective in protecting plants from leaf rust (Table 2). Single and double treatment of plants with MB effectively protected plants from powdery mildew and root rot in comparison with treatment with a mixture of commercial preparations. The crops of wheat treated with MB did not contain cereal aphids (Table 2), which may be associated with a combination of production of entomotoxins by *B. th.* and the synthesis of surfactin by *B. subtilis* strain 26D, which, as previously reported, is characterized by aficidity [10]. The negative effect of bacteria on the vital activity of aphids could also be associated with an increase in plant tolerance to damage [11], probably due to the production of phytohormones by microorganisms that stimulate plant growth, increase the rate of photosynthesis, as well as the availability of mineral nutrition elements [11, 12].

On the plots treated with MB, the number of leafhoppers decreased by almost 2 times in comparison with the control plots. Thrips also turned out to be sensitive to the components of the preparation. The least protective effect of MB was observed in relation to bread beetles and cereal flies.

Stimulation of plant growth by the MB with simultaneous protection against damage by insects and phytopathogens contributed to the formation of greater biological productivity. With a single treatment of plants with the MB, the grain yield in comparison with a single action of the mixture of Fitosporin-M and BTB increased by 0.26 ton/ha, and with a double application – up to 0.39 ton/ha in comparison with a double treatment with commercial preparations (Table 3). In general, one-

Table 2

Effect of treatment of wheat plants with biopreparations on phytopathological condition and on propagation of pests

Variant*	Prevalence rate of diseases, %				Insect pests (specimens per corresponding number of net swings at "milk earing phase" phase of wheat grain)				
	powdery mildew (*Erysiphe graminis*) at earing phase	septoria at "milk earing" phase	brown rust at "milk earing" phase	common root rot	greenbug	leafhoppers	thrips	cereal fleas	cereal flies
1	20	96	84	52	58±7	38±4	296±7	703±12	61±3
2	12	88	76	49	44±5	38±4	160±10	664±16	50±7
3	12	80	44	46	53±3	34±2	154±7	615±16	44±2
4	2	84	76	44	not found	20±1	216±12	610±12	52±5
5	2	76	72	42		20±1	194±9	601±7	54±4

Note: Variants of treatment see in Table 1.*

Table 3

Effect of biopreparation on growth and productivity of soft wheat plants

Variant*	Plants height, sm		Number of stems, things/m^2	Ear length, cm	Number of grains in ears, things	Weight of grains in one ear, g	Yield, ton/ha
	earing phase	phase of wax ripeness					
1	52.3	65.2	232	6.7	21	0.668	1.55
2	53.9	65.7	247	6.2	21	0.660	1.63
3	53.2	67.2	251	6.5	21	0.653	1.64
4	55.3	72.4	249	7.4	24	0.759	1.89
5	54.8	73.7	251	7.4	26	0.809	2.03
** $LSD_{0.05}$	2.5	3.3	11	1.0	3	0.036	0.11

*Note: * Variants of treatment see in Table1; ** Least significant difference at 0.05 significance level.*

and two-fold application of MB with a rate of 2 kg/ha allowed to obtain the largest increase in grain yield in the experiment, respectively, 0.34 and 0.48 ton/ha in comparison with the productivity on the control plots.

Conclusion

Thus, it was found that the treatment of wheat plants with a new ecologically safe microbiological composition effectively suppresses the spread of major diseases and harmful insects on the crops of these crops and allows a large increase in grain yield in comparison with the use of a mixture of commercial preparations BTB and Fitosporin-M. The use of the new microbiological composition allowed to obtain an additional 0.32 ton/ha of grain in comparison with the use of the preparations of combination of Fitosporin-M and BTB.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under Agreement No. 14.604.21.0016 (2014–2015), as well as within the framework of RFBR-ofi_m grants No. 17-29-08014 (2018).

References

1. Patel S., Sangeeta S. Pesticides as the drivers of neuropsychotic diseases, cancers, and teratogenicity among agro-workers as well as general public // Environmental Science and Pollution Research. 2019. V. 26. No. 1. P. 91–100. doi: 10.1007/s11356-018-3642-2

2. The state catalogue of pesticides and agrochemicals permitted for application on the territory of the Russian Federation. Part I. Pesticides. Moskva: Agricultural Ministry of Russia Federation, 2018. 752 p. (in Russian).

3. Zenas G., Crickmore N. *Bacillus thuringiensis* applications in agriculture // *Bacillus thuringiensis* Biotechnology. Chapter 2 / Ed. E. Sansinenea. Dordrecht: Springer. 2012. P. 19–39. doi: 10.1007/978-94-007-3021-2_2

4. De Pontes R.G.M.S., Soares C.M.S., Berry C. Composition based on *Bacillus* spp. and correlate genera and their use in pest control // European Patent 2061326A1. Publ. 06.03.2008.

5. Tanuja, Bisht S.C., Mishra P.K. Ascending migration of endophytic *Bacillus thuringiensis* and assessment of benefits to different legumes of N.W. Himalayas // European J. of Soil Biology. 2013. V. 56. P. 56–64. doi: 10.1016/j.ejsobi.2013.02.004

6. Burkhanova G.F., Veselova S.V., Sorokan' A.V., Blagova D.K., Nuzhnaya T.V., Maksimov I.V. Strains of *Bacillus* ssp. regulate wheat resistance to *Septoria nodorum* Berk. // Applied Biochemistry and Microbiology. 2017. V. 53. No. 3. P. 346–352. doi: 10.1134/S0003683817030048

7. Dospekhov B.A. Methods of field research. Moskva: Alliance, 2014. 351 p. (in Russian).

8. Guidelines for state testing of fungicides, antibiotics and seed dressings for agricultural crops. Moskva: 1985. 130 p. (in Russian).

9. Moronta-Barrios F., Gionechetti F., Pallavicini A., Marys E., Venturi V. Bacterial microbiota of rice roots: 16S-based taxonomic profiling of endophytic and rhizospheric diversity, endophytes isolation and simplified endophytic community // Microorganisms. 2018. V. 6. No. 1. Article No. 14. doi: 10.3390/microorganisms6010014

10. Maksimov I.V., Blagova D.K., Veselova S.V., Sorokan A.V., Burkhanova G.F., Cherepanova E.A., Sarvarova E.R., Rumyantsev S.D., Alekseev V.Yu., Khayrullin R.M. Recombinant *Bacillus subtilis* 26DCryChS line with gene *Btcry1Ia* encoding *Cry1Ia* toxin from *Bacillus thuringiensis* promotes integrated wheat defense against pathogen *Stagonospora nodorum* Berk. and greenbug *Schizaphis graminum* Rond. // Biological Control. 2020. V. 144. Article No. 104242. doi: 10.1016/j.biocontrol.2020.104242

11. Harun-Or-Rashid M.H., Chung Y.R. Induction of systemic resistance against insect herbivores in plants by beneficial soil microbes // Frontiers in Plant Science. 2017. V. 8. Article No. 1816. doi: 10.3389/fpls.2017.01816

12. Koch K.G., Chapman K., Louis J., Heng-Moss T., Sarath G. Plant tolerance: a unique approach to control *Hemipteran* pests // Frontiers in Plant Science. 2016. V. 7. Article No. 1363. doi: 10.3389/fpls.2016.01363

УДК 574.24;574.32 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-172-178

Изучение метаболитов *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений

© 2021. Ю. В. Батаева[1], к. б. н., в. н. с., зав. кафедрой, Л. Н. Григорян[1], ассистент, Е. А. Курашов[2, 3], д. б. н., зав. лабораторией, профессор, Ю. В. Крылова[3], к. г. н., зав. лабораторией, доцент, Е. В. Федорова[3], к. х. н., г. н. с., Е. Я. Явид[3, 4], аспирант, В. В. Ходонович[3], аспирант, Л. В. Яковлева[1], д. б. н., зав. кафедрой, доцент,

[1]Астраханский государственный университет,
414000, Россия, г. Астрахань, пл. Шаумяна, д. 1,
[2]Институт озероведения Российской академии наук,
обособленное подразделение СПб ФИЦ РАН,
196105, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9,
[3]Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ
«Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга),
199053, Россия, г. Санкт-Петербург, Набережная Макарова, д. 26,
[4]Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук,
187110, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д. 18,
e-mail: aveatab@mail.ru

В Астраханском регионе в условиях аридного экстремального климата с полупустынным ландшафтом формируются сообщества почвенных актиномицетов со специфическими свойствами и метаболитами. Метаболиты стрептомицетов представляют собой многокомпонентные комплексы различных по химическому строению природных соединений – антибиотиков, литических ферментов, аминокислот, витаминов, гормонов и др. Цель настоящих исследований – изучить компонентный состав суспензии и экстрактов штамма *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений. Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 выделен из бурых полупустынных почв Астраханской области с очень сильной степенью засоления. Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 выращивали при температуре +28 °С и pH = 7 ед. в течение 72 ч при непрерывном перемешивании на шейкере (120 об./мин) на картофельной среде. В работе изучен компонентный состав суспензии и экстрактов (водно-спиртового, метанольного и гексанового) штамма *S. carpaticus* RCAM04697 методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Анализ показал наличие в составе вторичных метаболитов – спиртов, альдегидов, углеводородов, эфиров, сульфатов и других групп низкомолекулярных органических соединений (НОС). При всех вариантах экстракции в составе НОС преобладали спирты и эфиры. Выявленные НОС обладают ценными с сельскохозяйственной точки зрения свойствами: противовирусными, противомикробными и противоопухолевыми (этил 5-(пиридин-4-ил)-1Н-пиразол-3-карбоксилат); бактерицидными, фунгицидными и антисептическими свойствами (1,2-гександиол); инсектоакарицидными (изопропилмиристат). 1-додеканол входит в состав феромонов, половых аттрактантов и сурфактантов для контроля численности насекомых-вредителей. Исследуемый штамм может быть использован в качестве основы для создания средств защиты растений, в качестве противовирусных средств, инсектицидов, акарицидов, фунгицидов, бактерицидов и фитостимуляторов.

Ключевые слова: стрептомицеты, метаболиты, суспензия, экстракт, газовая хромато-масс-спектрометрия.

Study of metabolites of *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 for the creation of environmentally friendly plant protection products

© 2021. Yu. V. Bataeva[1] ORCID: 0000-0003-1064-3731, L. N. Grigoryan[1] ORCID: 0000-0002-1132-2043, E. A. Kurashov[2, 3] ORCID: 0000-0002-4486-2804, J. V. Krylova[3] ORCID: 0000-0002-4274-2358, E. V. Fedorova[3] ORCID: 0000-0003-1667-5240, E. J. Iavid[3, 4] ORCID: 0000-0002-8049-4156, V. V. Khodonovich[3] ORCID: 0000-0002-3326-9773, L. V. Yakovleva[1] ORCID: 0000-0002-2240-9291,

[1]Astrakhan State University,
1, Shahumyan Pl., Astrakhan, Russia, 414000,
[2]Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences,
9, Sevastyanova St., St. Petersburg, Russia, 196105,
[3]Saint-Petersburg Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution
"All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography"
("GosNiorch" by L. S. Berg),
26, Makarova Nab., St. Petersburg, Russia, 199053,
[4]Federal State Budgetary Institution St. Petersburg Research Center
for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya St., St. Petersburg, Russia, 187110,
e-mail: aveatab@mail.ru

In the Astrakhan region, in the conditions of an arid extreme climate with a semi-desert landscape, communities of soil actinomycetes with specific properties are formed. The strain *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 was isolated from saline soils in the arid zone. The qualitative and quantitative composition of low molecular weight organic compounds (LMWOCs) in suspension and extracts of this strain (hexanic, water-alcoholic (50/50), methanolic), which has antiviral, insectoacaricidal, fungicidal, and phytostimulating properties, was studied by gas chromatography – mass spectrometry (GC/MS) using a gas chromatography – mass spectrometer SHIMADZU GCMS-QP2010 Ultra. Mass spectra were recorded in the scanning mode for the full mass range (30–1090 m/z) in the programmed temperature mode. The detected LMWOCs were identified using the mass spectrum libraries "NIST-2014" and "Wiley". GC/MS-analysis of metabolites of the strain showed that the identified LMWOCs have valuable properties from an agricultural point of view: bactericidal (2-methylpentane-2,4-diol); fungicidal (2-methylpentane-2,4-diol); insecticidal (propan-2-yl tetradecanoate). Dodecan-1-ol is a part of pheromones, sexual attractants, and surfactants for pest control. GC/MS analysis showed that the hexane extract of the strain *S. carpaticus* RCAM04697 had the largest number of metabolites – 13 LMWOCs, whereas the methanol extract contained only 3 LMWOCs. It should be noted that the identified metabolites confirm our earlier information that the suspension and extracts (hexanic, water-alcoholic (50/50), methanolic) of *S. carpaticus* RCAM04697 strain can be used as a basis for creating biological plant protection products with high biological effectiveness with insecticidal, acaricidal, fungicidal, bactericidal properties. Streptomycetes are an inexhaustible source of new biologically active substances that can be used in plant protection, agronomy, medicine, and veterinary medicine. Thus, we consider it necessary to continue research in the field of studying the properties of actinomycete metabolites, in particular, streptomycetes, due to the need to decipher the ecological and biochemical mechanisms of their existence, characterized by the great potential in various industries, and especially in the field of environmental agrotechnologies.

Keywords: streptomycetes, metabolites, suspension, extract, gas chromatography, mass spectrometry.

Актиномицеты в большом количестве встречаются в почве благодаря их способности легко адаптироваться к среде обитания, использовать в качестве субстрата органические соединения, которые непригодны для других микроорганизмов, и продуцировать вторичные метаболиты, что очень важно с экологической точки зрения [1, 2]. В Астраханском регионе в условиях аридного экстремального климата с полупустынным ландшафтом формируются сообщества почвенных актиномицетов со специфическими свойствами [3].

Свойства актиномицетов часто обоснованы синтезом вторичных метаболитов, которых может быть несколько у одной клетки [4]. Стрептомицеты имеют сложные метаболические пути, ответственные за производство вторичных метаболитов и использование органических остатков, существующих в почве [5]. Таким образом стрептомицеты участвуют в аллелопатических взаимодействиях с другими организмами почв, оказывая антагонистическое, нейтральное или положительное воздействие на них.

Исследователи отмечают, что метаболиты стрептомицетов представляют собой многокомпонентные комплексы различных по химическому строению природных соединений – антибиотиков, литических ферментов, аминокислот, витаминов, гормонов, терпеноидов, алкалоидов и др. [6–9]. Соединения, синтезируемые стрептомицетами, обладают антибиотическими, противовирусными, фунгицидными, антиоксидантными, целлюлозолитическими, инсектицидными и другими свойствами [10–13].

Данные вещества могут быть использованы в медицине, ветеринарии, биотехнологиях, растениеводстве и защите растений, поэтому стрептомицеты являются промышленно и фармацевтически важными экологически безопасными бактериями.

Цель настоящих исследований – изучить компонентный состав суспензии и экстрактов

штамма *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования явились трёхсуточная суспензия и 3 варианта экстрактов (водно-спиртовый, метанольный и гексановый) штамма *S. carpaticus* RCAM04697 с концентрацией клеток 10^9 КОЕ/мл. Несмотря на то, что вторичные метаболиты стрептомицетов синтезируются в основном в стационарной фазе процесса ферментации [14, 15], их компонентный состав у штамма *S. carpaticus* RCAM04697 изучен в лаг-фазе роста культуры, так как трёхсуточная суспензия данной бактерии обладает высокой биологической активностью [16], а концентрация 10^9 КОЕ/мл соответствует концентрации клеток в коммерческих биопрепаратах.

Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 выделен из бурых полупустынных почв Астраханской области с очень сильной степенью засоления. Идентификация штамма проведена с помощью метода секвенирования по Сэнгеру фрагмента последовательности гена 16S рРНК [17, 18] в Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (ФГБНУ ВНИИСХМ, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин). В данной коллекции штамм задепонирован.

Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 выращивали при температуре +28 °С и pH 7 ед. в течение 72 ч при непрерывном перемешивании на шейкере (120 об./мин) на картофельной среде [19]. Концентрацию клеток в суспензии определяли путём высева суспензии на плотную картофельную среду [20].

Метанольный и водно-спиртовый экстракты готовили из сухой биомассы исследуемого штамма *S. carpaticus* RCAM04697 с титром клеток 10^9 КОЕ/мл, полученной путём высушивания в ротационном вакуумном испарителе (IKA RV 10 digital). Сухую биомассу штамма заливали метанолом или раствором дистиллированной воды и этанола (50 : 50) в соотношении 1 мг/мл. После центрифугирования, удаления осадка, высушивания жидкости в ротационном испарителе при температуре от 60 до 70 °С получали сухие экстракты [21].

Для приготовления гексанового экстракта 250 мл суспензии (концентрация клеток 10^9 КОЕ/мл) штамма *S. carpaticus* RCAM04697, экстрагировали 5 мл гексана в течение 3 мин в делительной воронке [22]. Гексановый экстракт высушивали в ротационном испарителе. Экстракты сохраняли в морозильной камере при температуре -18 °С.

Качественный и количественный состав низкомолекулярных органических соединений (НОС) суспензии и гексанового, водно-спиртового, метанольного экстрактов штамма *S. carpaticus* RCAM04697 исследовали методом газовой хромато-масс-спектрометрии на приборе SHIMADZU GCMS-QP2010 Ultra в лаборатории гидробиологии ФГБУН Института озероведения РАН. Использовали неполярную колонку МТХ-1 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм. В качестве газа-носителя служил гелий. Масс-спектры снимали в режиме сканирования по полному диапазону масс (30–1090 m/z) в программированном режиме температур (35° – 3 мин, 2°/мин до 60° – 3 мин, 2°/мин до 80° – 3 мин, 4°/мин до 120° – 3 мин, 5°/мин до 150° – 3 мин, 15°/мин до 240° – 10 мин) с последующей пошаговой обработкой хроматограмм. Идентификацию выявленных НОС проводили с использованием библиотек масс-спектров «NIST-2014» и «Wiley» [23, 24].

Количественный анализ выполняли с использованием декафторбензофенона и бензофенона в качестве внутренних стандартов. Статистическую обработку данных проводили в программе Excel.

Результаты и обсуждение

Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 обладает наиболее выраженными инсектоакарицидными, фунгицидными и фитостимулирующими свойствами [25, 26], в связи с чем он был выбран для более детального исследования компонентного состава метаболитов.

Анализ методом газовой хромато-масс-спектрометрии показал наличие в составе вторичных метаболитов – спиртов, альдегидов, углеводородов, эфиров, сульфатов и других групп НОС, что согласуется с результатами других исследователей [27] и представлениями о стрептомицетах, как о продуцентах биологически активных метаболитов. При всех вариантах экстракции в составе НОС преобладали спирты и эфиры.

Обнаружено, что именно в гексановом экстракте штамма *S. carpaticus* RCAM04697 содержалось максимальное количество метаболитов – 13 НОС, в метанольном – минимальное – 3 НОС.

В наибольшем количестве обнаружено соединение этил 5-(пиридин-4-ил)-1Н-пиразол-

Таблица / Table

Состав экзогенных метаболитов суспензии и экстрактов штамма *S. carpaticus* RCAM04697
The set of exogenous metabolites suspensions and extracts of strain

Вещество (в скобках IUPAC имя), формула Substance (in brackets IUPAC name), formula	LRI	Гексановый экстракт Hexane extract		Водно-спиртовый экстракт Water-alcohol extract		Метанольный экстракт Methanol extract		Суспензия Suspension	
		%	C	%	C	%	C	%	C
2-Метилпентан-2,4-диол (2-methylpentane-2,4-diol) $C_6H_{14}O_2$	912	20,69	1,05	18,01	0,78	–	–	23,20	1,12
3-Гексилгидропероксид (3-hydroperoxyhexane) $C_6H_{14}O_2$	950	–	–	–	–	–	–	8,91	0,43
3-Бутенилпентиловый эфир (1-but-3-enoxypentane) $C_9H_{18}O$	967	19,49	0,99	15,59	0,68	–	–	32,17	1,55
2-Этилгексанол (2-ethylhexan-1-ol) $C_8H_{18}O$	1056	7,43	0,38	–	–	–	–	–	–
5-Оксогексил ацетат (5-oxohexyl acetate) $C_8H_{14}O_3$	1088	–	–	–	–	–	–	7,67	0,37
1-Додеканол (dodecan-1-ol) $C_{12}H_{26}O$	1481	4,69	0,24	10,25	0,45	–	–	3,64	0,17
Неидентифицированное (unidentified) m/z[M+], 97 (100)	1724	6,86	0,35	17,42	0,76	–	–	12,26	0,59
2,6,10,14-Тетраметилпентадекан [пристан] (2,6,10,14-tetramethyl-pentadecane) $C_{19}H_{40}$	1728	3,57	0,18	–	–	–	–	–	–
Неидентифицированное (unidentified) m/z[M+], 253 (100)	1787	8,80	0,45	6,19	0,27	–	–	5,17	0,25
Октадекан (octadecane) $C_{18}H_{38}$	1800	2,27	0,12	3,52	0,15	–	–	0,84	0,04
2,6,10,14-Тетраметилгексадекан [фитан] (2,6,10,14-tetramethyl-hexadecane) $C_{20}H_{42}$	1804	3,46	0,18	–	–	–	–	–	–
Изопропилмиристат (propan-2-yl tetradecanoate) $C_{17}H_{34}O_2$	1822	7,15	0,36	10,27	0,45	–	–	5,32	0,26
Метилпальмитат (methyl hexadecanoate) $C_{17}H_{34}O_2$	1929	–	–	–	–	15,9	0,48	–	–
8-Октадеценал ((E)-octadec-8-enal) $C_{18}H_{34}O$	2011	2,51	0,13	–	–	–	–	0,84	0,04
Метиловый эфир 8-октадеценовой кислоты (methyl octadec-8-enoate) $C_{19}H_{36}O_2$	2078	–	–	–	–	26,2	0,79	–	–
Тетракозан (tetracosane) $C_{24}H_{50}$	2400	7,55	0,38	–	–	–	–	–	–
Этил 5-(пиридин-4-ил)-1H-пиразол-3-карбоксилат (ethyl 3-pyridin-4-yl-1H-pyrazole-5-carboxylate) $C_{11}H_{11}N_3O_2$	2409	–	–	–	–	57,8	1,74	–	–
Бензол,1,1'-[2-метил-2-(фенилтио)циклопропилиден] бис-((1-methyl-2,2-diphenylcyclopropyl) sulfanylbenzene) $C_{22}H_{20}S$	2567	–	–	18,75	0,82	–	–	–	–
2-Метилпентокозан (2-methylpentacosane) $C_{26}H_{54}$	2583	5,53	0,28	–	–	–	–	–	–
Всего / Total:		100,0	5,1	100,0	4,4	100,0	4,8	100,0	3,0

Примечание: LRI – линейный индекс удерживания; % – доля соединения среди всех НОС; C – концентрация соединения в экстракте, мкг/г сухого вещества; «–» – вещество не определено / Note: LRI – linear retention index; % – percentage of the compound among all LMWOCs; C – the concentration of the compound in the extract, μg/g dry; "–" – substance not determined.

3-карбоксилат (57,8%) 0,00174 мг/г сухого вещества в метанольном экстракте (табл.). По данным [28], вещества, содержащие пиразол, характеризуются противовирусными, противомикробными и противоопухолевыми свойствами. Противовирусные свойства штамма *S. carpaticus* RCAM04697 исследованы нами ранее в полевых опытах на томатах и картофеле и показали высокую эффективность [29]. В метанольном экстракте обнаружены ещё два НОС, которых нет в других экстрактах и суспензии: метилпальмитат (15,9%), который находит применение в качестве эмульгатора и стабилизатора эмульсий [30]; метиловый эфир 8-октадеценовой кислоты (26,20%), содержащийся в эфирных маслах цитрусовых.

Мажорными метаболитами в суспензии, в гексановом и водно-спиртовом экстрактах оказались 3-бутенилпентиловый эфир и 2-метилпентан-2,4-диол (1,2-гександиол). Содержание их в суспензии составило 32,17 и 23,20%, в гексановом экстракте – 19,49 и 20,69% и в водно-спиртовом экстракте – 15,59 и 18,01% соответственно. 1,2-гександиол обладает бактерицидными, фунгицидными антисептическими свойствами, его используют как консервант, сурфактант, эмульгатор, растворитель, увлажнитель в косметических средствах [31, 32]. Фунгицидная активность штамма *S. carpaticus* RCAM04697 описана в патенте на изобретение [29]. В планах наших исследований – проверить бактерицидную активность штамма *S. carpaticus* RCAM04697 в отношении бактерий, вызывающих болезни растений, человека и животных.

1-Додеканол, выявленный в гексановом (4,69%), водно-спиртовом (10,25%) экстрактах, суспензии (3,64%), и пристан, определённый в гексановом экстракте (3,57%), входят в состав феромонов, половых аттрактантов и сурфактантов для контроля численности насекомых-вредителей [33]. Комплекс феромонов на основе 1-додеканола высвобождается в виде паров со всей поверхности ловушки в течение всего сезона.

Октадекан, обнаруженный в гексановом, водно-спиртовом экстрактах и суспензии, является бактериальным и растительным метаболитом. Содержание изопропилмиристата в суспензии составило 5,32%, в гексановом экстракте – 7,15%, в водно-спиртовом – 10,27%. Изопропилмиристат представляет собой сложный эфир жирной кислоты. Он используется в качестве пестицида против блох, клещей, вшей, растворяя воск, покрывающий экзоскелет насекомых [31]. Широко известны инсектицидные свойства эфиров жирных кислот биологического происхождения. 8-Октадеценал, содержащийся в гексановом экстракте и суспензии, используют в промышленности в качестве стабилизатора, загустителя и регулятора вязкости.

В водно-спиртовом экстракте (50/50) штамма *S. carpaticus* RCAM04697 обнаружено 8 НОС, из которых 2 – неидентифицированных. Среди 8 соединений наибольшее процентное содержание от общего объёма экстракта приходится на бензол,1,1'-[2-метил-2-фенилтио)циклопропилиден]бис- (18,75%). Возможные биологические эффекты данного соединения не изучены.

2-Этилгексанол обнаружен только в гексановом экстракте, его содержание составило 7,43% от всех НОС. 2-Этилгексанол – соединение, относящееся к классу спиртов, которое может оказывать нервно-паралитическое действие в отношении людей [34]. Тетракозан (7,55%) идентифицирован в гексановом экстракте и является составляющим компонентом экстрактов, полученных из различных органов растений [35]. 2-Метилпентокозан, выявленный в гексановом экстракте, используется в качестве растворителя и промежуточного продукта при производстве химических веществ [19].

3-Гексилгидропероксид был выявлен лишь в суспензии (8,91%), он применяется в качестве окислителя в препаративном синтезе.

Распределение по группам НОС суспензии и экстрактов штамма *S. carpaticus* RCAM04697 показало присутствие во всех вариантах эфиров; присутствие спиртов и углеводородов во всех образцах, за исключением метанольного; альдегиды представлены в гексановом экстракте и суспензии; сульфаты установлены только в водно-спиртовом экстракте (50/50).

Синтез одновременно нескольких вторичных метаболитов, обладающих различной биологической активностью, определяет многофункциональность штамма *S. carpaticus* RCAM04697 и перспективу его использования в производстве новых биопрепаратов.

Заключение

Как показали исследования, выявленные вещества обладают ценными с сельскохозяйственной точки зрения свойствами: противовирусными, противомикробными и противоопухолевыми (этил 5-(пиридин-4-ил)-1H-пиразол-3-карбоксилат); бактерицид-

ными, фунгицидными и антисептическими (1,2-гександиол); инсектоакарицидными (изопропилмиристат). 1-Додеканол входит в состав феромонов, половых аттрактантов и сурфактантов для контроля численности насекомых-вредителей.

Следует отметить, что выявленные метаболиты подтверждают полученные нами ранее сведения [25, 26] о том, что суспензия и экстракты (гексановый, водно-спиртовой (50/50), метанольный) штамма *S. carpaticus* RCAM04697 могут быть использованы в качестве основы для создания биологических средств защиты растений с противовирусными, инсектицидными, акарицидными, фунгицидными, бактерицидными свойствами.

Обнаруженные метаболиты широкого спектра действия штамма *S. carpaticus* RCAM04697, по-видимому, влияют на способность стрептомицетов к хорошей выживаемости и высокой конкурентоспособности в различных экологических нишах – почве, растениях и семенах.

Считаем необходимым продолжить исследования состава и свойств метаболитов стрептомицетов, характеризующихся большим потенциалом в различных отраслях промышленности, а особенно в области экологических агробиотехнологий.

Работа выполнена при поддержке УМНИК (Протокол заседания дирекции № 6 от 19 апреля 2019 г.) «Разработка полифункционального средства защиты растений на основе бактерий рода Streptomyces с инсектицидными и противовирусными свойствами», а также в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2019-0002.

References

1. Shirokikh I.G., Tovstik E.V., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya. Functional diversity of streptomycetes in soils of forest and meadow phytocenoses of technogenic territories // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 4. P. 74–81 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-074-081

2. Grigoryan L.N., Bataeva Y.V., Andreeva E.D., Zakar'yaeva D.Kh.,Turaeva Z.O., Antonova S.V. Study of the component structure of the metabolites of bacteria *Nocardiopsis umidischolae* in the search for eco-friendly plant protection agents // Russian Journal of General Chemistry. 2020. V. 90. P. 2531–254. doi: 10.1134/S1070363220130010

3. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Yakovleva L.V., Shlyakhov V.A. Microbiological composition of saline soils of arid territories // Modern science: actual problems of theory and practice. Series "Natural and Technical Sciences". 2018. No. 12. P. 6–14 (in Russian).

4. Cho J.Y., Kim M.S. Antibacterial benzaldehydes produced by seaweed-derived *Streptomyces atrovirens* PK288-21 // Fisheries Science. 2012. V. 78. No. 5. P. 1065–1073. doi: 10.1007/s12562-012-0531-3

5. Carrillo L., Benítez M.R., Maldonado M.J. Alkalithermophilic actinomycetes in a subtropical area of Jujuy, Argentina // Revista Argentina de Microbiologia. 2009. V. 41. No. 2. P. 112–116.

6. Abdel-Razek A.S., Hamed A., Frese M., Sewald N., Shaaban M. Penicisteroid C: new polyoxygenated steroid produced by co-culturing of *Streptomyces piomogenus* with *Aspergillus niger* // Steroids. 2018. V. 138. P. 21–25. doi: 10.1016/j.steroids.2018.06.005

7. Widdick D., Vior N.M., Gomez-Escribano J.P., Bibb M.J., Royer S.F., Wang H., Davis B.G. Analysis of the tunicamycin biosynthetic gene cluster of *Streptomyces chartreusis* reveals new insights into tunicamycin production and immunity // Antimicrobial Agents and Chemotherapy. 2018. V. 62. No. 8. Article No. e00130-18. doi: 10.1128/AAC.00130-18

8. Choudoir M.J., Pepe-Ranney C., Buckley D.H. Diversification of secondary metabolite biosynthetic gene clusters coincides with lineage divergence in Streptomyces // Antibiotics. 2018. V. 7. No. 1. Article No. 12. doi: 10.3390/antibiotics7010012

9. Shirokikh I.G., Nazarova Ya.I., Shirokikh A.A., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Search for streptomycetes-cellulolytics for processing plant waste // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 162–168 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-162-168

10. Dolzhenko T.V. Actinomycete metabolites to protect the garden from pests // Vestnik OrelGAU. 2012. No. 3 (36). P. 91–93 (in Russian).

11. Jung S.J., Lee J.K., Kim N.K., Lee D.H., Hong S.I. Screening and evaluation of Streptomyces species as a potential biocontrol agent against a wood Decay fungus, *Gloeophyllum trabeum* // Mycobiology. 2018. V. 46. No. 2. P. 138–146. doi: 10.1080/12298093.2018.1468056

12. Amaresan N.J., Naik H., Kumar K., Bapatla K.G., Mishra R.K. In plant growth promotion: mechanisms and role // New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: *Actinobacteria*: Diversity and Biotechnological Applications / Eds. B.P. Singh, V.K. Gupta, A.K. Passari. Elsevier, 2018. P. 125–135. doi: 10.1016/B978-0-444-63994-3.00008-4

13. Shirokikh I.G., Bakulina A.V., Nazarova Ya.I., Shirokikh A.A. Effect of *Streptomyces castelarensis* A4 on the incidence and yield of field crop rotation crops // Mikologiya i Fitopatologiya. 2020. No. 54 (1). P. 59–66. doi: 10.31857/S0026364820010080

14. Egorov N.S. Fundamentals of the doctrine of antibiotics: textbook. Moskva: Nauka, 2004. 528 p. (in Russian).

15. Berdy J. Are actinomycetes exhausted as a source of secondary metabolites? // Proc. 9th Intern. Symp. Biol. of Actinomycetes. Moskva, 1994. P. 27.

16. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Shlyakhov V.A., Magzanova D.K., Baymukhambetova A.S. Phytotoxicity and insecticidal activity of actinomycetes isolated from saline soils of arid territory // South of Russia: ecology, development. 2020. V. 15. No. 2. P. 103–112 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2020-2-103-112

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.

18. Tamura K., Peterson D., Peterson N., Stecher G., Nei M., Kumar S. MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parismony methods // Molecular Biology and Evolution. 2011. V. 28. P. 2731–2739. doi: 10.1093/molbev/msr121

19. Gause G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Determinant of actinomycetes. Genera *Streptomyces, Streptoverticilium, Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).

20. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M., Kolotilova N.N. Practicum on microbiology. Moskva: Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).

21. Boikova I.V., Kozlova E.G., Anisimova O.S., Kononenko A.V. Indocide and gerben-promising biopreparations for closed soil // Protection and quarantine of plants. 2007. No. 9. P. 40–41 (in Russian).

22. Krylova J.V., Kurashov E.A., Korkishko N.N. The pollution of Lake Ladoga by organochlorine pesticides and petroleum products // Lakes and Reservoirs: Research and Management. 2003. No. 8 (3–4). P. 231–246. doi: 10.1111/j.1440-1770.2003.00225

23. Latest NIST Mass Spectral Library: Expanded Coverage, Features [Internet recourse] https://www.nist.gov/news-events/news/2014/07/latest-nist-mass-spectral-library-expanded-coverage-features (Accessed: 13.04.2021).

24. Wiley STM Databases. Mass Spectral and GC Data of Drugs, Poisons, Pesticides, Pollutants and Their Metabolites. Edition 2011. User Manual. Version 1.0. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, STM Databases, Weinheim, 2011.

25. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Shlyakhov V.A. Influence of *Streptomyces carpathicus* RCAM 04697 bacterial strain on photostimulation, tomato phytoviruses and insect pests in laboratory conditions // Natural and technical sciences. 2020. No. 6 (144). P. 58–61 (in Russian).

26. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Shlyakhov V.A. Biological justification of the use of a suspension of the strain of *Streptomycetes carpaticus* VKSM 04697 for the protection of tomatoes from insect pests and phytopathogens in the open ground // Natural and technical sciences. 2020. No. 6 (144). P. 54–57 (in Russian).

27. Bereziuk Y., Boortseva S., Byrsa M., Garaeva S., Manciu A. The amino acid composition of the biomass of the strain *Streptomyces fradiae* CNMN-AC-11, cultivated on a complex medium with bio products of a cyanobacterial nature // Analele Universitatii din Oradea, Fascicula Biologie. 2017. V. 24. No. 2. P. 60–65.

28. Karrouchi K., Radi S., Ramli Y., Taoufik J., Mabkhot Y.N., Al-aizari F.A. Synthesis and pharmacological activities of pyrazole derivatives // Molecules. 2018. V. 23. No. 1. Article No. 134. doi: 10.3390/molecules23010134

29. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Shlyakhov V.A., Dzerzhinskaya I.S. Streptomces carpaticus strainfor protection from insect pests, fungal, viral diseases andtomato growth stimulation // Patent No. 2695157 Russian Federation, IPC C12N 1/20,A 01 N 63/02, C12R1/465. Application: 2018113688, 13.04.2018. Date of publication: 22.07.2019. Bul. 21 (in Russian).

30. Lewis R.J., Van N.Y. Condensed chemical dictionary Hawley. 12th ed. New York: Strand Rheinhold, 1993. 776 p.

31. Lide D.R., Milne G.W.A. Handbook of data on organic compounds. V. I. CRC Press, Inc. Boca Raton. Florida. 1994. V. 3. P. 2551–3107.

32. 1,2-Hexanediol in cosmetics [Internet resource] https://kosmokis.ru/ingredients/12-hexanediol (Accessed: 13.04.2021) (in Russian).

33. Nikolsky B.P. General information, structure of matter, properties of the most important substances, laboratory equipment // Handbook of chemists. Moskva-Leningrad. 1966. V. 1. P. 1071 (in Russian).

34. Ernstgård L. Acute effects of 1 mg/m^3 of vaporized 2-ethyl-1-hexanol in humans // Indoor Air. 2010. V. 20. No. 2. P. 168–175. doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00638. x

35. Nishanbaev S.Z., Shamyanov I.D., Bobakulov Kh.M., Sagdullaev Sh.Sh. Chemical composition and biological activity of plant metabolites of the genus Alhagi (review) // Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya. 2019. No. 4. P. 5–28 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2019045117

УДК 632.938.1:358

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-179-185

Поражённость семян гороха (*Pisum sativum* L.) патогенными микроорганизмами

© 2021. Т. П. Градобоева, к. б. н., с. н. с.,
Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,
e-mail: tp.gradoboeva@mail.ru

Анализ многолетних данных (2014–2018 гг.) показал высокую заражённость семян гороха патогенами. В результате микологического анализа были идентифицированы грибы родов *Ascochyta*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Pennicillum*, *Cladosporium*, а также выявлен возбудитель бактериоза *Pseudomonas syringae* var. *pisi*. Грибы рода *Ascochyta* были представлены двумя видами: *A. pisi* и *A. pinodes*. Среди грибов рода *Fusarium*, выделенных на зерне гороха, превалировали *F. oxysporum* var. *pisi*, *F. avenaceum*, *F. sporotrichioides* и *F. culmorum*. Состав грибов и поражение ими гороха изменялись в зависимости от условий года и сорта. Значительная доля в комплексе семенной инфекции во все годы исследований приходилась на грибы рода *Alternaria*. На зерне они встречались практически на всех сортах (96,5–100,0%), за исключением L-1325 (Швеция). Наибольшую опасность представляют также часто присутствующие в микобиоте семян возбудители аскохитоза (17,4–93,5%), фузариоза (6,5–68,8%) и бактериоза (39,1–80,0%). Отсутствие аскохитоза на семенах отмечено у 12,2%, фузариоза – у 31,2%, бактериоза – у 13,5% из 237 изученных сортов. В результате многолетней оценки выделены перспективные генотипы (Tigra (Германия), Е-3907, Е-3335, Е-3767, Е-4030, Д-23417 (Россия), Кемчуг (Памир)), у которых поражение семян аскохитозом, фузариозом и бактериозом за годы испытания не превысило 4%. Данный показатель имеет важное значение в практической селекции, направленной на создание устойчивых к наиболее вредоносным болезням, экологически безопасных сортов гороха.

Ключевые слова: горох, заражённость зерна, устойчивость, аскохитоз, фузариоз, бактериоз.

Infestation of pea seeds (*Pisum sativum* L.) with pathogenic microorganisms

© 2021. T. P. Gradoboeva ORCID: 0000-0002-8712-3083,
Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
e-mail: tp.gradoboeva@mail.ru

Injuriousness of seed infection is very high. So, the aim of our study was estimation of pathogenic microflora on peas seeds and screening of cultivars on seed defeat with most harmful pathogenes. As a result of perennial monitoring of contamination of peas seeds, it is revealed annual existing of fungi of genera *Ascochyta*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Pennicillum*, *Cladosporium*as well as agents of bacteriosis *Pseudomonas syringae* var. *pisi* on their surface. Fungi of genus *Ascochyta* spp. were represented with two species: *A. pisi*, *A. pinodes*. Within fungi of genus *Fusarium* determined on peas seeds, *F. oxysporum* var. *pisi*, *F. avenaceum*, *F. sporotrichioides*, *F. culmorum* prevail. Fungi composition and defeat of cultivars with them varied in dependence of year conditions and cultivar. Significant part in complex of seed infection for all year of study belongs to fungi of genus *Alternaria*. They were met practically on seeds of all cultivars (96.5–100.0%), with except of cultivar L-1325 (Sweden). Most dangerous present agents of diseases often exist in mycobiota of seeds: ascochyta blight (17.4–93.5%), fusariosis (6.5–68.8%) and bacteriosis (39.1–80.0%). 237 cultivars and genotypes of peas of domestic and foreign breeding were studied. For study period (2014–2018) seeds were defeated in the highest degree with ascochyta blight. Hard and very hard degree of defeat of seed with this disease was noted in 27.1 and 19.8% of genotypes. For fusariosis defeat these parameters were 2.5 and 17.3%, for bacteriosis – 31.2 and 1.4%. Absence of ascochyta blight on seeds noted in 12.2%, fusariosis – in 31.2%, bacteriosis – 13.5% of studied cultivars. As a result of perennial evaluation perspective genotypes were selected (Tigra (Germany), E-3907, E-3335, E-3767, E-4030, Д-23417 (Russian Federation, Kemchug (Pamir)), which had defeat of seeds with ascochyta blight, fusariosis, and bacteriosis not higher than 4% for all years of study. This parameter has high importance in practical breeding.

Keywords: peas, seed contamination, resistance, ascochyta blight, fusariosis, bacteriosis.

Горох посевной (*Pisum sativum* L.) – это культура многоцелевого использования. Широко известно, что он является важнейшим источником кормового и пищевого белка, одним из лучших предшественников для зерновых и других культур [1]. В меньшей степени известно, что горох посевной также очень интересный продукт с технической и медицинской точек зрения. Крахмал семян гороха с высоким содержанием амилазы пригоден для производства биоразлагаемых пластмасс, плёнок и т. д. [2]. В фармокопии фитостерины, выделенные из семян гороха, предлагается использовать для изготовления препаратов, применяемых для профилактики сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний [3]. Несмотря на значимость этой культуры, на её долю в России приходится не более 2% от общего производства зерновых и зернобобовых культур [4].

Одним из основных факторов, лимитирующим реализацию генетического потенциала стабильно высокой урожайности современных сортов гороха, являются болезни. Несмотря на большое разнообразие возделываемых сортов гороха, практически все сорта в той или иной степени поражаются болезнями [5, 6]. Аскохитоз и фузариоз гороха – одни из наиболее распространённых и вредоносных болезней гороха, которые снижают качество семян и вызывают серьёзные потери урожая [7, 8]. Очень высока вредоносность семенной инфекции. Заражённость семян может достигать 40%. При сильном поражении аскохитозом семена теряют 50–70% всхожести.

Фузариозом поражаются экономически важные культуры во всём мире [9, 10]. При сильном развитии болезни недобор урожая может достигать 30–50%. Часть возбудителей фузариоза являются продуцентами микотоксинов, которые вызывают микотоксикозы у теплокровных организмов [11]. Семена, поражённые возбудителем бактериоза (*Pseudomonas syringae*), также имеют низкие посевные качества.

Больные семена являются источниками первичной инфекции. Полностью обеззаразить семена гороха, даже при обработке химическими протравителями, невозможно. Сорта сельскохозяйственных культур, а также патогены, поражающие эти культуры, имеют важное средообразующее значение. Сорта, обладающие устойчивостью, экологически безопасны, так как не требуют проведения химической защиты от болезней. Для сортов, восприимчивых к патогенам, необходимы интенсивные химические обработки. Чаще всего это приводит к загрязнению почвы, грунтовых и поверхностных вод, растительной продукции, частичному уничтожению полезной биоты. Селекция на устойчивость к болезням – одно из приоритетных направлений в селекционных программах [12]. Замена восприимчивых сортов новыми устойчивыми является наиболее доступным экономически и экологически оправданным способом защиты гороха от болезней.

Цель наших исследований – определить патогенную микрофлору на семенах гороха и провести скрининг сортов на низкую поражённость семян наиболее опасными патогенами.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на Фалёнской селекционной станции (филиал ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока) в 2014–2018 гг. Годы проведения исследований, существенно различались между собой по погодным условиям. Гидротермический коэффициент по Селянинову в 2014 г. был 1,3; в 2015 г. – 1,5; в 2016 – 0,7; в 2017 –2,0; в 2018 г. – 0,8. Материалом для изучения являлись 237 сортов и сортообразцов гороха отечественной и зарубежной селекции. Анализ семян гороха на наличие возбудителей болезней проводили методом проращивания семян во влажной камере и с последующей микологической оценкой. Закладку делали в 3–4-х повторениях. Видовой состав грибов определяли, руководствуясь определителями и другой литературой [13–14].

Классификацию генотипов по группам устойчивости проводили по следующей шкале: И – иммунные (по результатам многолетних данных поражения нет); УУ – высокоустойчивые (поражение не более 1–2%); У – устойчивые (не более 3–5%); С – среднеустойчивые (не более 6–10%); В – восприимчивые (не более 11–20%); ВВ – сильно восприимчивые (более 20%). Для иммунологической характеристики использовали самые высокие значения показаний поражения и развития болезни из повторений по годам исследования.

Статистическая обработка данных проведена по [15] с использованием компьютерной программы Agros 2.07.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований было установлено ежегодное присутствие

на семенах гороха грибов родов *Ascochyta*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Pennicillum*, *Cladosporium*, а также возбудителей бактериоза *Pseudomonas syringae* var. *pisi*. Грибы рода *Ascochyta* были представлены двумя видами: *A. pisi* Lib. и *A. pinodes* Jones. Среди грибов рода *Fusarium*, выделенных на зерне гороха, превалировали *F. oxysporum* (Schlecht.) var. *pisi* (Hall), *F. avenaceum* (Fr.) Sacc., *F. sporotrichioides* Sherb. и *F. culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.

На семенах одного сорта и даже на одном зерне может одновременно присутствовать несколько видов грибов. Состав грибов и поражение ими гороха изменяются в зависимости от условий года и сорта.

Отмечена незначительная заражённость семян грибами из родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*. Однако в период хранения зерна грибы этих родов могут вызвать плесневение зерна, поэтому следует учитывать их наличие.

Результаты, приведённые на рисунке 1, свидетельствуют, что на семенах гороха чаще всего встречался альтернариоз (возбудитель – *A. alternate* (Fr.) Keissler, Ellis). Частота встречаемости возбудителя этой болезни была высокой во все годы исследования (95,6–100,0%), а её изменчивость по годам – очень низкой (коэффициент вариации (*V*) равнялся 1,9%).

Частота встречаемости возбудителей аскохитоза и бактериоза в 2014, 2015 и 2017 гг. была так же высокой (аскохитоза – 93,5; 91,1; 70,8%, бактериоза – 78,3; 80,0; 75,0% соответственно) и более низкой в 2016 и 2018 гг. (45,8; 17,4 и 52,1; 39,1% соответственно). В меньшем количестве встречались грибы рода *Fusarium*. Значения признака оказались самыми нестабильными (*V* = 71,9%) и распределились по годам следующим образом: от 2014 г. к 2018 г. – 6,5; 55,6; 12,5; 68,8 и 45,6%.

Дисперсионный двухфакторный анализ выявил, что при поражении семян фузариозом

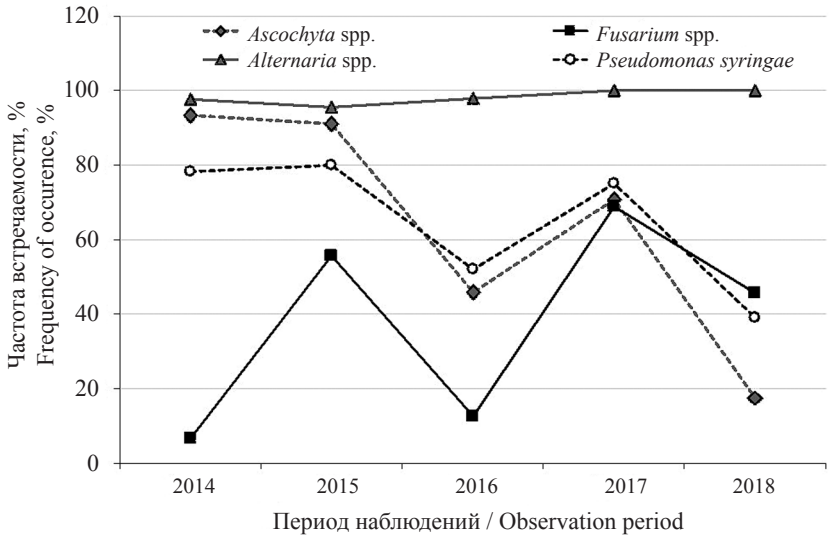


Рис. 1. Частота встречаемости возбудителей болезни на сортах гороха в период наблюдений
Fig. 1. Frequency of occurrence of disease agent on peas cultivars during the observation period

Таблица 1 / Table 1

Влияние условий года и сорта на поражение семян различных генотипов гороха
Influence of year and variety conditions on seed damage of different peas genotypes

Факторы Factors	Доля фактора в проявлении болезни, % Share of factor in disease manifestation, %			
	аскохитоз ascochyta blight	фузариоз fusariosis	альтернариоз alternaria blight	бактериоз bacteriosis
А (сорт) A (cultivar)	23,7	20,0	10,1	23,0
В (условия года) B (conditions of year)	20,0	8,6	54,1	16,4
Взаимодействие АВ A x B interaction	30,6	29,0	22,6	29,0

и бактериозом большее значение имеет фактор сорта, а также его сочетание с условиями года (табл. 1). Доля сорта и доля погодной составляющей в поражении семян аскохитозом примерно одинаковы, а их взаимодействие усиливает поражение. Доля сорта в поражении семян альтернариозом не превышала 10,1%. Доля погодной составляющей в проявлении болезни была высокой – 54,1%.

Из факторов погодной составляющей на частоту встречаемости возбудителей аскохитоза, бактериоза, альтернариоза и поражения ими семян наибольшее влияние оказывали влажность, количество дней с осадками в период вегетации; фузариоза – количество дней с осадками. Отмечено, что чем больше дней с осадками и высокой влажностью, тем сильнее поражение аскохитозом. Коэффициент корреляции (r) между поражением семян аскохитозом и суммой минимальной влажности ≥ 70 и 80% составил соответственно 0,44 и 0,51; между поражением и количеством дней с указанной влажностью – 0,41 и 0,51 ($p \leq 0{,}05$); между поражением и суммой осадков – 0,44; поражением и количеством дней с осадками – 0,53. При минимальной влажности 50 и 60% значение r равнялось 0,43 и 0,41 ($p \leq 0{,}05$).

Установлена высокая достоверная степень взаимосвязи между заражённостью зерна бактериозом и суммой минимальной влажности ≥ 50 и 60% и количеством дней с этой влажностью – 0,87 и 0,91; 0,84 и 0,90 ($p \leq 0{,}01$). Более высокая влажность и количество дней с этой влажностью также значимы для поражения семян бактериозом. Однако статистические данные показывают, что корреляционная связь с возрастанием влажности ослабевает. Так, например, коэффициент корреляции между поражением и минимальной влажностью ≥ 70 и 80%, поражением и количеством дней с этой влажностью был 0,81 ($p \leq 0{,}01$) и 0,71 ($p \leq 0{,}05$), соответственно. Поражение семян бактериозом также, как поражение аскохитозом, в меньшей степени зависит от суммы осадков в период вегетации ($r = 0{,}44$), чем от количества дней их выпадения ($r = 0{,}77$). На поражение альтернариозом в равной степени влияют сумма осадков ($r = 0{,}60$) и количество дней их выпадения ($r = 0{,}59$). Выявлена положительная корреляционная связь между поражением семян альтернариозом и суммами относительной минимальной влажности воздуха выше или равных 50% ($r_{влажность} = 0{,}53$, $r_{дней} = 0{,}55$), 60% ($r_{влажность} = 0{,}54$, $r_{дней} = 0{,}56$), 70 % ($r_{влажность} = 0{,}49$, $r_{дней} = 0{,}48$), 80% ($r_{влажность} = 0{,}22$, $r_{дней} = 0{,}22$).

По сумме среднесуточных температур ≥ 20 и 25 °С и количеству дней с этими температурами наблюдалась обратная зависимость проявления всех отмеченных выше болезней.

Несмотря на то, что изменчивость частоты встречаемости альтернарии на семенах гороха по годам была очень низкой, пределы изменчивости поражения сортов по годам были нестабильны. Сорта различались по поражению семян возбудителем болезни. Диапазон между минимальным и максимальным поражением у сортов был высоким – от 0% у L-1325 до 94,0% у E-630 (табл. 2). Патогеном поражались все исследуемые сорта, за исключением L-1325 (Швеция).

Изменчивость поражения семян аскохитозом, фузариозом и бактериозом по годам была значительной.

Количества сортов с отсутствием признаков поражения семян в период с 2014 по 2018 гг., распределилось следующим образом: аскохитозом – 13,3; 7,8; 57,5; 34,3; 59,6%; фузариозом – 68,1; 40,0; 87,7; 32,3; 57,7%; бактериозом – 15,0; 10,4; 40,6; 26,3; 71,4% соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Поражение семян гороха / Defeat of peas seeds

Болезни Diseases	Поражение по годам, % / Defeat in different years, %									
	2014		2015		2016		2017		2018	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Аскохитоз Ascochyta blight	10,5	0–50,0 $V = 82$	13,6	0–52,0 $V = 73$	3,1	0–48,0 $V = 151$	5,2	0–32,0 $V = 116$	2,6	0–28,0 $V = 148$
Фузариоз Fusariosis	0,5	0–12,0 $V = 472$	3,5	0–38,0 $V = 128$	0,6	0–8,0 $V = 310$	4,3	0–20,0 $V = 104$	3,4	0–24,0 $V = 160$
Альтернариоз Alternaria blight	17,1	0–60,0 $V = 55$	16,1	0–72,0 $V = 89$	29,8	0–92,0 $V = 72$	67,9	10,0–94,0 $V = 25$	36,3	9,0–72,0 $V = 41$
Бактериоз Bacteriosis	8,6	0–30,0 $V = 78$	9,1	0–62,0 $V = 91$	4,4	0–20,0 $V = 112$	6,5	0–62,0 $V = 114$	2,5	0–40,0 $V = 201$

Примечание: 1 – среднее; 2* – min-max / Note: 1* – average; 2 * – min-max.*

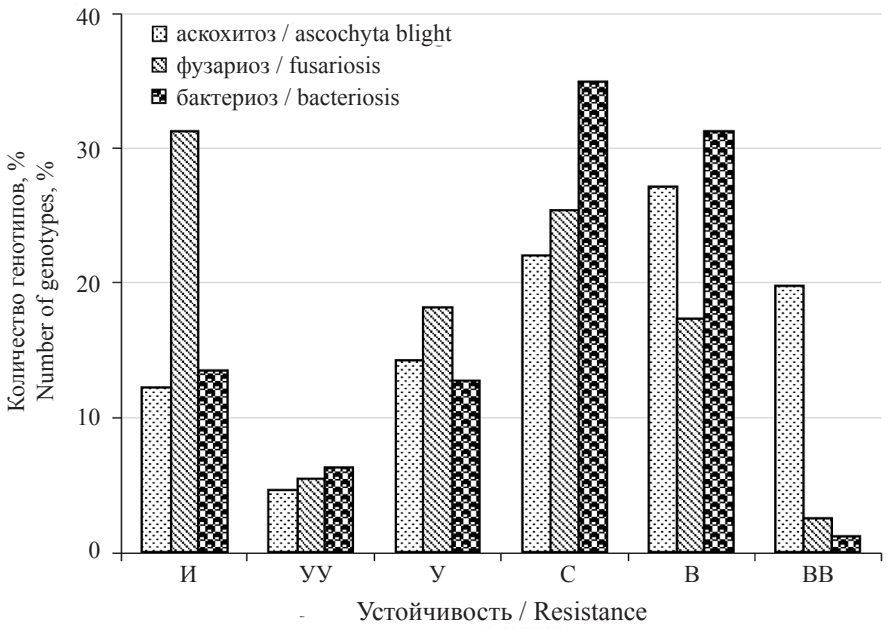


Рис. 2. Структура устойчивости генотипов гороха: И – иммунные, УУ – высокоустойчивые, У – устойчивые, С – среднеустойчивые, В – восприимчивые, ВВ – сильно восприимчивые
Fig. 2. Structure of resistance in peas genotypes: И – immune, УУ – highly resistant, У – resistant, С – middle resistant, В – susceptible, ВВ – highly susceptible

Таблица 3 / Table 3

Поражение сортов гороха болезнями, 2014–2019 гг.
Defeat of peas cultivars with diseases, 2014–2019

Сорт Cultivar	Географическое происхождение Geographical origin	Поражение, % / Defeat, %		
		аскохитоз ascochyta blight	фузариоз fusariosis	бактериоз bacteriosis
Tigra	Германия / Germany	0	0	0
Е-3907	Кировская область / Kirov region	0	0	0–4
Красивый / Krasivy	Нижегородская, Кировская области Nizhny Novgorod, Kirov region	0–2	0	0
Кемчуг/ Kemchug	Памир / Pamir	0–2	0–2	0
Е-3335	Кировская область / Kirov region	0–4	0	0
Д-23417		0–4	0	0–4
Е-3767		0–4	0	0
Е-4030		4	0	0
Орёл 330 / Orel 330	Орловская область / Orel region	4	0–2	0
WPH 892 Ji 843	Англия / Great Britain	0	0	0–8
Флора / Flora	Московская область / Moscow region	0	0	0–8
Е-182	Кировская область / Kirov region	0–2	0	4–10
Е-3977		0–2	0	0–8
Верхолузская Verkholuzskaya	Республика Коми / Komi Republic	0–4	0–6	0–4
Е-3588	Кировская область / Kirov region	0–4	0–4	0–10
Рябчик / Ryabchik		0–4	0–12	0–6
Красноуфимский 93 Krasnoufimsky 93	Свердловская область / Sverdlovsk region	0–26	0–16	0–30

Несмотря на то, что в исследуемые годы *Alternaria* spp. присутствовала практически на всех сортах, по мнению [16], способна продуцировать некоторые токсичные метаболиты, вредоносность альтернариоза значительно ниже, чем при поражении аскохитозом, фузариозом и бактериозом. При посеве альтернариозных семян в почву сильного снижения их всхожести не наблюдалось, а поражённость растений корневой гнилью оставалась на уровне контроля [17].

Исходя из того, что зависимость между поражением бобов и семян аскохитозом отсутствует [18], а устойчивость растений, и даже отдельных органов, к возбудителям этой болезней контролируется различными генами [19], изучение устойчивости сортов по семенам имеет большое значение для создания сортов с комбинированной устойчивостью стебля, листьев, бобов и семян. Экономически значимыми вредными болезнями гороха во всем мире являются аскохитоз и фузариоз, поэтому оценка на устойчивость проводилась к этим болезням.

Сильнее всего семена поражались аскохитозом. Сильная и очень сильная степень поражения семян этой болезнью была отмечена у 27,1 и 19,8% генотипов (рис. 2). По поражению фузариозом эти показатели равнялись 2,5 и 17,3%, бактериозом – 31,2 и 1,4%. Ко всем болезням доля высокоустойчивых и устойчивых форм была примерно одинаковой (в отношении аскохитоза – 4,6 и 14,3%, фузариоза – 5,5 и 18,2%, бактериоза – 6,3 и 12,7%). Во все годы исследований были выделены сорта, у которых не было видимого поражения семян аскохитозом, фузариозом и бактериозом.

У сорта Tigra в период испытания поражение семян аскохитозом, фузариозом и бактериозом не наблюдалось (табл. 3). Выявлена группа перспективных источников, которые сочетали в генотипе очень высокую устойчивость к аскохитозу и фузариозу с устойчивостью к бактериозу (Е-3907); высокую устойчивость к аскохитозу и очень высокую устойчивость к фузариозу и бактериозу (Красивый); высокую устойчивость к аскохитозу и фузариозу и очень высокую устойчивость к бактериозу (Кемчуг); устойчивость к аскохитозу и очень высокую устойчивость к фузариозу и бактериозу (Е-3335, Е-3767, Е-4030). Сорт Д-23417 имел слабое поражение семян аскохитозом и бактериозом и не поражался фузариозом. Такие сорта, как WPH 892 Ji 843, Флора, Е-182, Е-3977, обладающие очень высокой устойчивостью к фузариозу и высокой или очень высокой устойчивостью к аскохитозу, при этом в средней степени поражающиеся бактериозом, могут быть так же предложены для селекции на устойчивость к болезням. Сорта Верхолузская и Е-3588, характеризующиеся устойчивостью к аскохитозу и средней устойчивостью к фузариозу и бактериозу, вероятно, также будут интересны для практической селекции как источники аскохитозоустойчивости.

Заключение

Изучение заражённости зерна гороха ежегодно выявляло наличие грибов родов *Ascochyta, Fusarium, Alternaria, Aspergillus, Pennicillum, Cladosporium,* а также возбудителей бактериоза *Pseudomonas syringae* var. *pisi*.

На зерне исследуемых сортов чаще всего встречались возбудители альтернариоза (96,5–100,0%). Частота встречаемости возбудителей аскохитоза (17,4–93,5%) и бактериоза (39,1–80,0%) была также высокой. В меньшем количестве встречались грибы рода *Fusarium* (6,5–68,8%).

Состав грибов и поражение ими сортов изменялись в зависимости от условий года и сорта. Из факторов погодной составляющей на частоту встречаемости возбудителей аскохитоза, бактериоза, альтернариоза и поражения ими семян наибольшее влияние оказывали влажность, количество дней с осадками в период вегетации, фузариоза – количество дней с осадками.

В результате многолетней оценки выделены перспективные сорта Tigra, Е-3907, Е-3335, Е-3767, Е-4030, Д-23417, Кемчуг, у которых поражение семян за годы испытания не превысило 4,0%. Данный показатель имеет важное значение в практической селекции, направленной на создание устойчивых сортов, которые позволяют сократить использование химических средств защиты растений от болезней и способствовать оздоровлению экологической обстановки.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0767-2019-0097.

References

1. Kuz'mina S.P., Kazydub N.G., Bondarenko E.V. Use of cluster analysis in vegetable peas breeding // Vestnik NGAU. 2018. No. 1. P. 35–42 (in Russian).

2. Bograchtva T., Topliff J., Meares C. Starch thermoplastic films from a range pea (*Pisum sativum*) mutants // 5th Europ. Conf. on Grain Legumes. Dijon-France, 2004. P. 47–48.

3. Krasnuk I.I., Glinkina A.E., **Trishin A.V., Gradu**shko A.T., Danenko F.V. Pea sisterin: biological activity // Farmacia. 2009. No. 5. P. 18–20 (in Russian).

4. Review of peas market [Internet recourse] http://ideiforbiz.ru/obzor-rynka-goroha-v-rossii.htm (Accessed: 19.05.2018) (in Russian).

5. Agryamanesh N., Byrne O., Hardie D., Khan T., Siddique K., Yan G. Large – scale density – based screening for pea weevil resistance in advanced backcross lines derived from cultivated field pea (*Pisum sativum*) and *Pisum fulvum* // Crop Pasture Sci. 2012. V. 63. No. 7. P. 612–618. doi: 10.1071/CP12225

6. Li W., Deng Y., Ning Y., He Z., Wang G.-L. Exploiting broad-spectrum disease resistance in crops: from molecular dissection to breeding // Annual Review of Plant Biology. 2020. V. 71. P. 575–603. doi: 10.1146/annurev-arplant-010720-022215

7. Rubiales D., Fondevilla S., Chen W., Gentzbittel L., Higgins T.J.V., Castillejo M.A., Singh K.B., Rispail N. Achievements and challenges in legume breeding for pest and disease resistance // Critical Reviews in Plant Sciences. 2015. V. 34. No. 1–3. P. 195–236. doi: 10.1080/07352689.2014.898445

8. Olle M., Sooväli P. The severity of field pea diseases depending on sowing rate and variety // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science. 2020. V. 70. No. 7. P. 556–563. doi: 10.1080/09064710.2020.1803958

9. Thomas R. Gordon Fusarium oxysporum and the *Fusarium* wielt syndrome // Annual Review of Phytopathology. 2017. V. 55. P. 23–39.

10. Zitnick-Anderson K., Simons K., Pasche J.S. Detection and qPCR quantification of seven *Fusarium* species associated with the root rot complex in field pea // Canadian Journal of Plant Pathology. 2018. V. 40. No. 2. P. 261–271. doi: 10.1080/07060661.2018.1429494

11. Gagkaeva T.Yu., Gavrilova O.P. Grain contamination with fungi *Fusarium* in Krasnodar and Stavropol' territories // Zashchita i karantin rasteniy. 2014. No. 3. P. 30–32 (in Russian).

12. Poland J., Rutkoski J. Advances and challenges in genomic selection for disease resistance // Annual Review of Phytopathology. 2016. V. 54. P. 79–98. doi: 10.1146/annurev-phyto-080615-100056

13. Bilaj V.I. *Fusarium*. Kiev: Naukova dumka, 1977. 441 p. (in Russian).

14. Shirokikh A.A, Shirokikh I.G., Sheshegova T.K. Atlas of microorganisms of agricultural crops. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipographiya, 2004. 48 p. (in Russian).

15. Dospekhov B.A. Methods of field experiment. Moskva: Kolos, 1985. 336 p. (in Russian).

16. Gannibal F.B., Orina A.S., Levitin M.M. Alternariosis of agricultural crops in territory of Russia // Zashchita i karantin rasteniy. 2010. No. 5. P. 30–32 (in Russian).

17. Gagkaeva T.Yu., Dmitriev A.P., Pavlyushin V.A. Grain microbiota – parameter of its quality and safety // Zashchita i karantin rasteniy. 2012. No. 9. P. 14–18 (in Russian).

18. Gradoboeva T.P. Peas cultivar resistance against ascochytosis under changing environmental conditions // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2017. No. 2. P. 17–22 (in Russian).

19. Chekalin N.M. Genetical basis of legumes breeding for resistance against pathogenes. Poltava: Intergrafika, 2003. 186 p. (in Russian).

УДК 504.064.3 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-186-192

Влияние состава питательной среды на чувствительность водоросли *Dunaliella tertiolecta* к бихромату калия

© 2021. Е. С. Стравинскене, к. б. н., ст. преподаватель, Ю. С. Григорьев, к. б. н., профессор, Т. Л. Шашкова, к. б. н., доцент, М. А. Субботин, ст. преподаватель, М. А. Полосухина, инженер,
Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79,
e-mail: estravinskene@sfu-kras.ru

Исследовано воздействие модельного токсиканта на рост культуры водоросли *Dunaliella tertiolecta* в среде Гольдберга, приготовленной на основе растворов готовой морской соли различных производителей, а также раствора NaCl. Прирост культуры водоросли в контроле во всех вариантах питательных сред составлял 10–15 раз через 48 ч культивирования. Бихромат калия в концентрации 5 мг/дм^3 оказывал слабое воздействие или вовсе не влиял на рост тест-культуры в средах, приготовленных на основе растворов морской соли. При этом внесение той же концентрации бихромата калия в среду, приготовленную на основе раствора NaCl, полностью подавляло рост тест-объекта. Результаты химического анализа всех исследованных растворов морской соли показали близкое для природной морской воды соотношение основных ионов. Все исследованные образцы растворов морской соли содержали от 5 до 8% ионов магния и кальция, что является возможным объяснением более низкой чувствительности *Dunaliella tertiolecta* к бихромату калия в этих средах, поскольку жёсткость среды влияет на биодоступность токсикантов для тест-организмов.

Ключевые слова: *Dunaliella tertiolecta*, биотестирование, бихромат калия, питательная среда, морская соль.

Effect of the cultivation medium composition on *Dunaliella tertiolecta* sensitivity to potassium dichromate

© 2021. E. S. Stravinskene ORCID: 0000-0002-8685-2620, **Yu. S. Grigor'ev** ORCID: 0000-0003-4324-0728, **T. L. Shashkova** ORCID: 0000-0002-2871-0069, **M. A. Subbotin** ORCID: 0000-0001-6145-5218, **M. A. Polosukhina** ORCID: 0000-0002-7898-819X,
Siberian Federal University,
79, Prospekt Svobodny, Krasnoyarsk, Russia, 660041,
e-mail: estravinskene@sfu-kras.ru

The effect of a model toxicant on the growth of the algae *Dunaliella tertiolecta* in Goldberg medium, prepared on the basis of solutions of various sea salt complexes, as well as NaCl alone solution, has been studied. The growth of algae in the controls was 10–15 times after 48 hours in all variants of media. Potassium dichromate at a concentration of 5 mg/L had little or no effect on the growth of the test culture in media prepared from the sea salt solutions. Simultaneously, the same concentration of potassium dichromate completely suppressed the algae growth in NaCl-media. The results of the chemical analysis of all the studied sea salt solutions showed a ratio of the main ions close to that of natural sea water. All studied samples of sea salt solutions contained 5 to 8% magnesium and calcium ions, which is a possible explanation for the lower sensitivity of *Dunaliella tertiolecta* to potassium dichromate in these media, since the hardness of the medium affects the bioavailability of toxicants for test organisms.

Keywords: *Dunaliella tertiolecta*, bioassay, potassium dichromate, cultivation medium, sea salt.

Результаты токсикологических тестов на одних и тех же или идентичных организмах могут значительно различаться по причине отличий в физических и химических условиях проведения биотестирования [1]. Поэтому при осуществлении сравнительного анализа токсичности веществ для микроводорослей нужно особое внимание уделять методике выполнения таких тестов [1]. Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на результаты

биотестирования, признан состав питательной среды [2–4].

Разработка оптимального состава питательной среды для проведения биотестирования на микроводорослях является важной задачей; в течение регламентированного времени токсикологического эксперимента тест-объект должен сохранять экспоненциальный рост и не испытывать недостатка в питательных элементах. Вместе с тем, неоднократно было показано, что состав питательной среды может определять степень проявления токсических свойств тестируемых веществ по отношению к микроводорослям [3–5]. В частности, в высококонцентрированной питательной среде наблюдалось снижение чувствительности водорослей к ионам тяжёлых металлов [6]. Согласно некоторым литературным данным, чувствительность водорослей к металлам удавалось значительно увеличить в условиях пониженного содержания макроэлементов [7, 8].

При проведении биотестирования на морских водорослях стандартная методика допускает приготовление питательной среды на основе растворов готовой морской соли [9]. Состав питательной среды при таком подходе сложно контролировать, в ней могут оказаться компоненты, влияющие на биодоступность тестируемых веществ, что в итоге может значительно повлиять на результаты токсикологических экспериментов. Возможным решением данной проблемы может стать использование вместо готовой морской соли раствора хлорида натрия. В связи с этим, целью настоящей работы являлась оценка воздействия модельного токсиканта ($K_2Cr_2O_7$) на динамику роста и прирост тест-культуры водоросли *Dunaliella tertiolecta* Butcher в средах, приготовленных на основе морской соли разных производителей и раствора NaCl.

Материалы и методы исследования

Маточную культуру микроводоросли *D. tertiolecta* выращивали в питательной среде Гольдберга, содержащей 200 мг/дм^3 KNO_3; 9,5 мг/дм^3 $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$; 0,2 мг/дм^3 $MnCl_2 \cdot 4H_2O$; 0,2 мг/дм^3 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$; 0,3 мг/дм^3 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и приготовленной на основе раствора морской соли с концентрацией 20 г/дм^3. Выращивание и поддержание культуры водоросли производили в климатостате Р2 (ТУ 4211-012-26218570-2014) при непрерывном освещении белым светом (1200±200 лк) и температуре 20±2 °С. Маточные культуры содержали в колбах объёмом 100–500 см^3, регулярно перемешивали и профильтровывали. Для поддержания альгологической чистоты и экспоненциальной стадии роста культуры пересев её в свежую среду производили каждые трое суток. Перед биотестированием маточную культуру профильтровывали через 4 слоя марли и разбавляли до оптической плотности 0,250±0,010 средой Гольдберга. Оптическую плотность суспензии водоросли измеряли на приборе ИПС-03 в кювете 2 см при длине волны 560 нм (ТУ 4437-003-26218570-2006).

Культуру водоросли вносили в стаканы, содержащие контрольную среду Гольдберга, приготовленную на основе растворов морской соли различных торговых марок (Red Sea Salt, Red Sea, Израиль; Tetra Marine Sea Salt, Tetra GmbH, Германия; Coral Marine Easy Mix, GROTECH GmbH, Германия; МА, «Морской аквариум на Чистых прудах», Россия–Германия) или NaCl в концентрации 20 г/дм^3, а также тестируемые пробы с добавлением 5 мг/дм^3 $K_2Cr_2O_7$. При этом, в результате разбавления, исходная оптическая плотность тест-культуры была равна 0,0075±0,0025 единиц, что эквивалентно (3,9±1,3) · 10^4 клеток/см^3. Далее приготовленные пробы в объёме 30 см^3 вносили в 18 стеклянных флаконов в трёх повторностях. Флаконы закрывали полиэтиленовыми пробками с отверстием для газообмена и устанавливали в автоматизированный культиватор УЭР [10]. Культиватор помещали в климатостат Р2, где производилось одновременное выращивание 18 проб культуры водорослей при температуре 25±0,5 °С и интенсивности света 2500±500 лк. Регистрацию оптической плотности образцов производили автоматически в течение всего эксперимента (48 ч) с интервалом 30 мин, что позволило построить кривые роста тест-культуры. Всё используемое в работе оборудование разработано в Сибирском федеральном университете (СФУ).

После регистрации результатов эксперимента проводили их статистическую обработку. Средние значения и стандартные отклонения рассчитывали по значениям трёх повторностей каждой из тестируемых проб. Достоверность отличий между тестируемыми и контрольными вариантами оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента ($p < 0,05$).

Химический анализ растворов морских солей производили в Испытательной лаборатории Центра коллективного пользования Института нефти и газа СФУ. Содержание основных ионов, характерных для морских вод, определяли методом капиллярного элек-

трофореза [11], хлорид-титрованием [12] и сульфат-гравиметрией [13].

Результаты и обсуждение

Динамика роста культур микроводорослей, как правило, следует S-образной кривой, включающей стадии лаг-фазы, экспоненциального роста, стационарного роста и гибели [14]. Изменение характера кривой роста может свидетельствовать о неблагоприятных воздействиях, в том числе при наличии в среде токсикантов или недостатке питательных элементов [14]. В частности, токсическое воздействие на культуру водоросли может выражаться в увеличении длительности лаг-фазы [15]. В этой связи нами были исследованы кривые роста культуры *D. tertiolecta* в контрольных вариантах и в присутствии модельного токсиканта (бихромата калия).

Полученные кривые роста тест-культуры (рис. 1) показали существенное отличие чувствительности водоросли к $K_2Cr_2O_7$ при выращивании в средах на основе морской соли и NaCl. Внесение бихромата калия в концентрации 5 мг/дм^3 полностью подавляло рост тест-культуры в среде, приготовленной на растворе хлорида натрия (рис. 1а). Прирост культуры водоросли в среде, приготовленной на основе морской соли Red Sea Salt, в при-

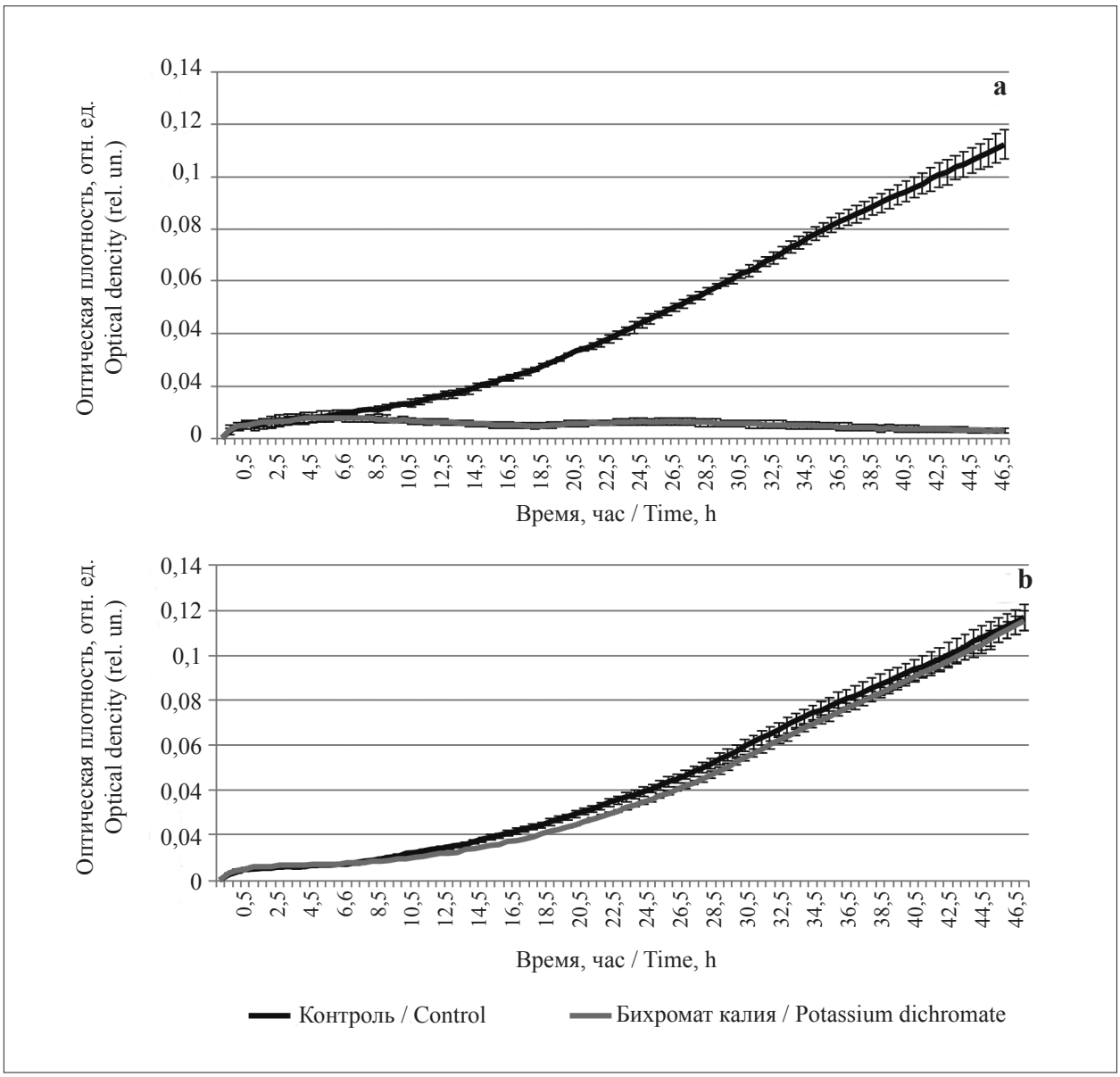


Рис. 1. Кривые роста культуры *D. tertiolecta* в средах на основе NaCl (a) и морской соли Red Sea Salt (b) в контрольном варианте и в присутствии 5 мг/дм^3 бихромата калия
Fig. 1. Growth curves of *D. tertiolecta* culture in media based on NaCl (a) and Red Sea Salt (b) in control and in samples containing 5 mg/dm^3 of potassium dichromate

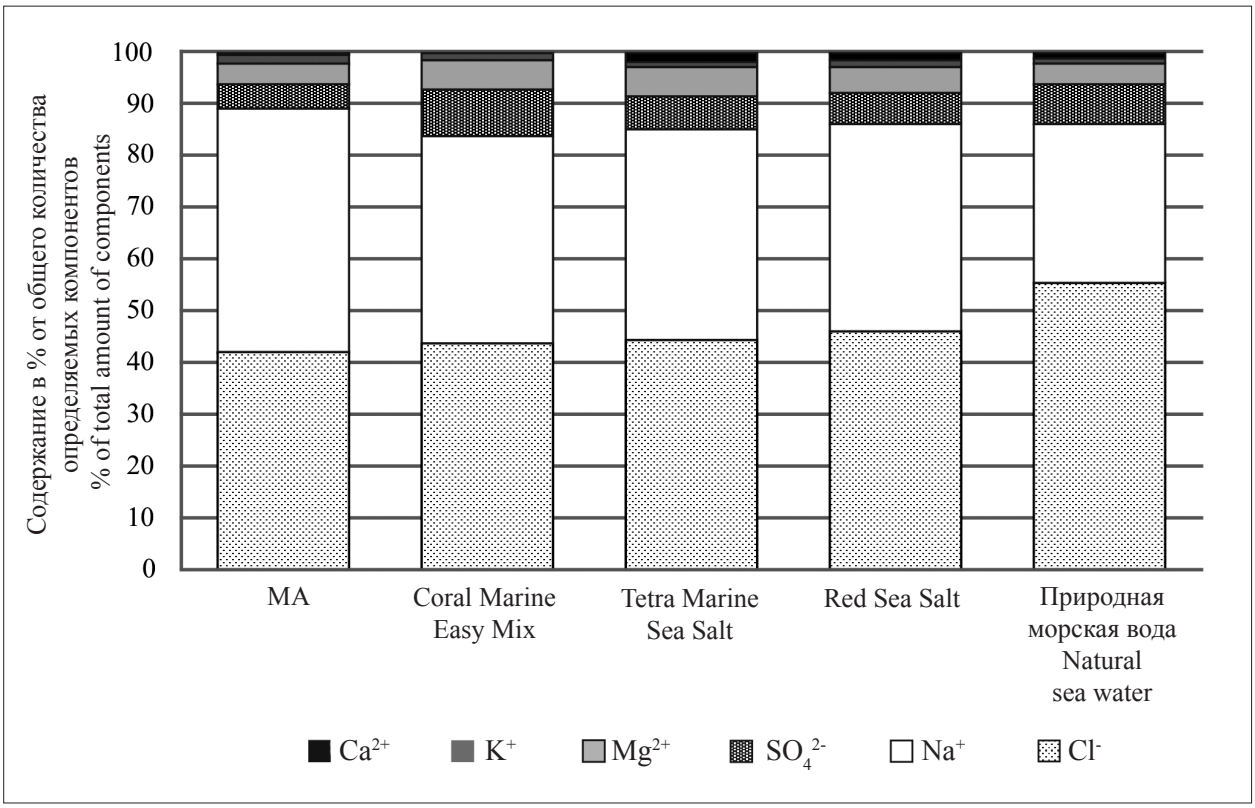


Рис. 2. Доля основных ионов (%) в общем количестве определяемых компонентов в растворах морской соли (данные химического анализа) и природной морской воде [18]
Fig. 2. Proportion of basic ions (% of the total content) in sea salt solutions (chemical analysis data) and natural seawater [18]

сутствии модельного токсиканта достоверно не отличался от такового в соответствующем контрольном варианте (рис. 1b). Подобное снижение чувствительности тест-объекта было показано нами ранее для пресноводной водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer в средах, содержащих увеличенное количество питательных элементов [6].

Одним из вероятных объяснений эффекта снижения чувствительности водорослей в некоторых средах может являться уменьшение биодоступности токсикантов при взаимодействии с компонентами таких сред [16, 17]. В связи с этим нами было определено содержание основных ионов в растворах исследуемых морских солей (рис. 2). Согласно полученным данным, в растворах морской соли всех четырёх производителей от 11 до 16% составляли ионы кальция, магния, калия, а также SO_4^{2-} (рис. 2). Такое распределение ионов практически не отличается от данных для природной морской воды, где они в совокупности составляют 14% (рис. 2, [18]), однако эти ионы в растворе NaCl могут присутствовать только в следовых количествах. При этом доля катионов Ca^{2+} и Mg^{2+}, определяющих жёсткость воды, составляла от 5 до 8% в исследуемых растворах (рис. 2). Следует отметить, что влияние жёсткости воды на проявление токсического воздействия различных веществ было неоднократно показано в отношении разных тест-организмов. В частности, было выявлено снижение токсичности никеля для рачков *Daphnia pulex* при повышенном содержании кальция и магния [19]; токсичность полимеров для водоросли *Raphidocelis subcapitata* также снижалась с увеличением жёсткости [20]. В качестве возможного механизма подобного ослабляющего действия Ca^{2+} и Mg^{2+} на проявление токсических свойств веществ предложена конкуренция этих ионов с токсикантами у поверхности клетки [19]. Таким образом, более высокая чувствительность водоросли *D. tertiolecta* в среде, приготовленной на основе раствора NaCl (рис. 1), может быть следствием отсутствия в ней ионов, определяющих жёсткость воды.

Как показали результаты исследований (рис. 1), замена морской соли в составе питательной среды на раствор NaCl позволяла значительно увеличить чувствительность водоросли *D. tertiolecta* к бихромату калия. Однако при таком подходе, несмотря на то,

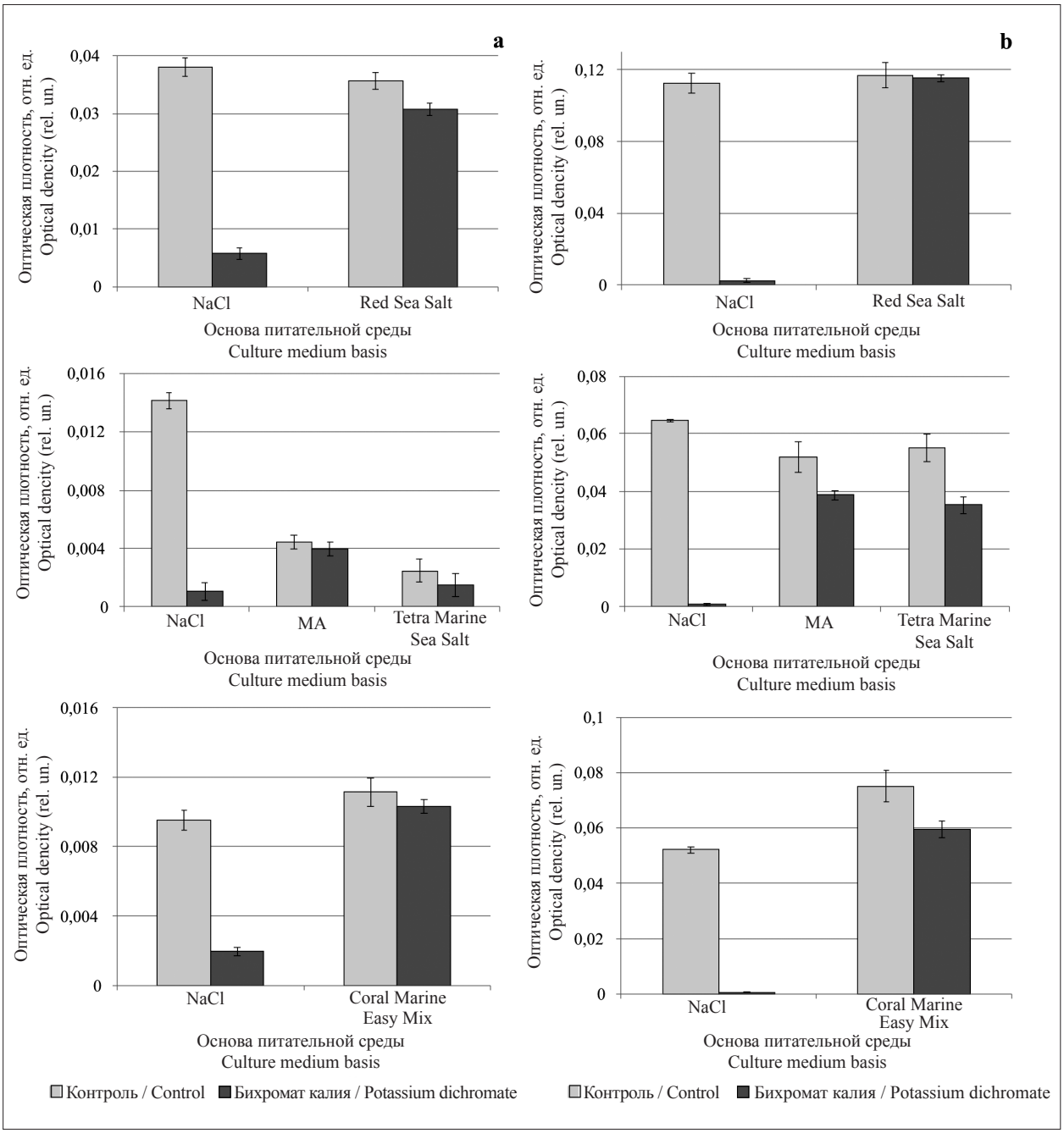


Рис. 3. Оптическая плотность культуры *D. tertiolecta* через 24 (a) и 48 (b) часов культивирования в питательных средах разного состава в контроле и при добавлении 5 мг/дм^3 бихромата калия
Fig. 3. The optical density of *D. tertiolecta* culture after 24 (a) and 48 (b) hours of cultivation in growth media of different composition in controls and in samples containing 5 mg/dm^3 of potassium dichromate

что концентрации основных питательных веществ во всех вариантах сред сохраняются одинаковыми (см. состав среды Гольдберга), существует вероятность недостаточного снабжения водоросли отдельными элементами, добавляемыми вместе с морской солью. Оценить приемлемость подобной модификации питательной среды можно по показателю конечного прироста оптической плотности тест-культуры в контрольных вариантах. Как видно из рисунка 1, оптическая плотность культуры водоросли после 48 ч выращивания различалась незначительно в двух вариантах сред, увеличившись за этот период в 11 и 12 раз в средах на основе NaCl и Red Sea Salt соответственно. Таким образом, отсутствие компонентов, привносимых в питательную среду с морской солью, не сказывалось неблагоприятно на росте тест-культуры водоросли *D. tertiolecta* при культивировании в течение

двух суток. Возможно, недостающие компоненты питания в ней восполнялись из среды с морской солью, на которой выращивалась маточная культура водоросли.

Кривые роста водоросли *D. tertiolecta* дают подробную информацию о состоянии тест-объекта в течение всего времени тестирования, поскольку регистрация оптической плотности осуществляется через каждые 30 мин. Вместе с тем при рассмотрении большого количества вариантов, а также для рутинного анализа, более удобным является отображение тест-функций в конкретные моменты времени. В качестве таких измерений нами были приняты данные по оптической плотности культуры водоросли, зарегистрированные после 24 и 48 ч культивирования (рис. 3). Полученные результаты позволили выявить, что среди исследованных 4 питательных сред на основе морской соли различных марок в двух (Tetra Marine Sea Salt и MA) прирост тест-культуры был существенно ниже такового в среде на основе NaCl после первых суток культивирования (рис. 3). Так, прирост в среде, приготовленной на морской соли Tetra Marine Sea Salt составлял 18% от прироста водоросли в среде на основе NaCl (рис. 3). Вместе с тем, прирост водоросли через 24 ч в среде на основе соли Coral Marine Easy Mix, практически не отличающейся по составу от Tetra Marine Sea Salt (рис. 2), превышал таковой в среде на основе NaCl. Одним из возможных объяснений таких различий может быть присутствие не учтённых в химическом анализе компонентов морской соли, влияющих на начальные этапы роста культуры водоросли.

Через 48 ч прирост тест-культуры практически выравнивался в контрольных средах на основе NaCl и морской соли Red Sea Salt. В одном из вариантов питательной среды (содержащей морскую соль Coral Marine Easy Mix) прирост был выше такового в среде на основе NaCl в течение всего времени культивирования (рис. 3). В целом, во всех контрольных вариантах через двое суток оптическая плотность культуры водоросли увеличивалась в 10–15 раз. При этом воздействие бихромата калия на прирост водоросли было значительно ниже во всех вариантах питательных сред, приготовленных на основе исследованных вариантов морской соли по сравнению со средой Гольдберга на основе NaCl. Подавление прироста тест-культуры составляло 97,5; 37,2; 25,3 и 19,9% в средах на основе растворов NaCl, Tetra Marine Sea Salt, MA и Coral Marine Easy Mix соответственно, а в среде на основе соли Red Sea Salt достоверное снижение прироста в присутствии бихромата калия (5 мг/дм^3) отсутствовало (рис. 3).

Таким образом, проведённые исследования показали возможность недооценки токсического эффекта при биотестировании на галофильных водорослях в средах, приготовленных на основе готовой морской соли. Вместе с тем, дискуссионным остаётся вопрос о соответствии данных, полученных в лаборатории в средах с низким содержанием влияющих на биодоступность токсикантов, результатам в реальных условиях в природных водных объектах [20]. Следует отметить, что наравне с показателем жёсткости воды, не менее важным фактором, влияющим на биодоступность токсикантов, является содержание в среде растворённого органического вещества [20]. Данный фактор может иметь решающее значение в проявлении токсических свойств некоторых веществ в природных водах [6]. Кроме того, степень проявления токсических свойств веществ также может определяться уровнем фосфатов в среде [21]. Оценка значения этих факторов при биотестировании на водоросли *D. tertiolecta* также является важной задачей в целях совершенствования существующих методов.

Заключение

Полученные нами результаты показали значительное снижение токсического воздействия бихромата калия на рост культуры *D. tertiolecta* при культивировании её в средах, приготовленных из растворов морской соли различных марок. Использование питательной среды, приготовленной на основе раствора NaCl, позволило существенно увеличить чувствительность тест-объекта к $K_2Cr_2O_7$.

References

1. Nyholm N., Källqvist T. Methods for growth inhibition toxicity tests with freshwater algae // Environmental Toxicology and Chemistry. 1989. V. 8. P. 689–703. doi: 10.1002/etc.5620080807

2. Wang W.X., Dei R.C.H. Effects of major nutrient additions on metal uptake in phytoplankton // Environmental Pollution. 2001. No. 111. P. 233–240. doi: 10.1016/S0269-7491(00)00071-3

3. Miao A.J., Wang W.X. Cadmium toxicity to two marine phytoplankton under different nutrient conditions // Aquatic Toxicology. 2006. No. 78. P. 114–126. doi: 10.1016/j.aquatox.2006.02.008

4. Källqvist T. Effect of water hardness on the toxicity of cadmium to the green alga *Pseudokirchneriella*

subcapitata in an artificial growth medium and nutrient-spiked natural lake waters // Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. 2009. No. 72. P. 277–283. doi:10.1080/15287390802539368

5. Anu P.R., Nandan S.B., Jayachandran P.R., Don Xavier N.D., Midhun A.M., Mohan D. Toxicity effects of zinc on two marine diatoms, under varying macronutrient environment // Marine Environmental Research. 2018. No. 142. P. 275–285. doi: 10.1016/j.marenvres.2018.10.013

6. Stravinskene E.S. Problem of heavy metal bioavailability in environmental monitoring of natural waters: dis. ... kand. biol. nauk. Krasnoyarsk, 2012. 119 p. (in Russian).

7. Chen C.Y., Theoretical evaluation of the inhibitory effects of mercury on algal growth at various orthophosphate levels // Water Research. 1994. V. 28. No. 4. P. 931–937. doi: 10.1016/0043-1354(94)90101-5

8. Chen C.Y., Lin K.C., Yang D.T. Comparison of the relative toxicity relationships based on batch and continuous algal toxicity tests // Chemosphere. 1997. V. 35. No. 9. P. 1959–1965. doi: 10.1016/S0045-6535(97)00270-1

9. Methods for estimation of toxicity by growth inhibition of marine microalgae *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin and *Sceletonema costatum* (Greville) Cleve. GOST R 53910-2010 (ISO 10253:2006). Moskva: Standartinform, 2011. 40 p. (in Russian).

10. Stravinskene E.S., Grigor'ev Yu.S. Novel rapid bioassay of sea waters on algae *Dunaliella tertiolecta* // Antropogennoye vliyaniye na vodnyye organizmy i ekosistemy: Sbornik materialov V vserossiyskoy konferentsii. 2014. P. 177–180 (in Russian).

11. Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring mass concentrations of potassium, sodium, lithium, magnesium, calcium, ammonium, strontium, barium cations in drinking, natural, and waste water samples by capillary electrophoresis using the "Kapel" capillary electrophoresis system. PND F 14.1:2:4.167-2000. Moskva: State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection, 2000. 20 p. (in Russian).

12. Drinking water. Methods for determination of chloride content. GOST 4245-72. Moskva: Standartinform, 2010. P. 487–492 (in Russian).

13. Mass concentration of sulfates in waters. Measurement technique by the gravimetric method. RD 52.24.483-2005. Moskva: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 2005 (in Russian).

14. Kreshchenovskaya M.A., Orlova T.Yu. Ultrastructural changes in marine microalgae under laboratory culture conditions // Voprosy sovremennoy algologii. 2014. No. 2 (6) [Internet resource] http://algology.ru/545 (Accessed: 15.04.2019) (in Russian).

15. Lustigman B., Korky J., Zabady A., McCormick J.M. Absorption of Cu++ by long-term cultures of *Dunafiella salina*, *D. tertiolecta*, and *D. viridis* // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1985. No. 35. P. 362–367.

16. Linnik P.N., Nabivanets B.I. Metal migration forms in freshwater bodies. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1986. 241 p. (in Russian).

17. Gueguen C., Koukal B., Dominik J., Pardos M. Competition between alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*), humic substances and EDTA for Cd and Zn control in the algal assay procedure (AAP) medium // Chemosphere. 2003. No. 53. P. 927–934. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00719-7

18. Davidov L.K., Dmitrieva A.A., Konkina N.G. General hydrology. Leningrad: Hydrometeoisdat, 1973. 464 p. (in Russian).

19. Kozlova T., Wood C.M., McGeer J.C. The effect of water chemistry on the acute toxicity of nickel to the cladoceran *Daphnia pulex* and the development of a biotic ligand model // Aquatic Toxicology. 2009. V. 91. No. 3. P. 221–228. doi: 10.1016/j.aquatox.2008.11.005

20. Salinas E.R., Bozich J.S., Kolbenschlag S., Kary-Heinrich M., Hopp P.W., Lukas R., Zok S., Hidding B. Aquatic testing guidelines insufficiently control the influence of dilution water toc and hardness on cationic polymer toxicity – A proposal to improve standardized test procedures // Chemosphere. 2020. V. 259. Article No. 127473. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127473

21. Rocha G.S., Lombardi A.T., Melão M.G.G. Influence of phosphorus on copper toxicity o *Selenastrum gracile* (Reinsch) Korshikov // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. No. 128. P. 30–35. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.007

УДК 574.583:582.263:574.63:574.64 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-193-197

Влияние фуллеренов C_{60} и C_{70} на развитие и фотосинтез культуры водоросли *Scenedesmus quadricauda*

© 2021. Г. А. Даллакян, к. б. н., с. н. с., В. И. Ипатова, к. б. н., с. н. с., И. В. Михеев, к. х. н., ассистент, А. М. Лазарева, магистр, С. И. Погосян, д. б. н., профессор,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,
e-mail: honaris@bk.ru

В связи с возрастающим производством фуллеренов и вероятностью их поступления в окружающую среду исследования эффектов воздействия их на биологические системы, в частности, – на водные организмы, становятся особенно актуальными. В работе описаны эффекты воздействия водной дисперсии фуллеренов C_{60} и C_{70} в концентрациях 1, 5 и 10 мг/л на численность клеток, эффективность фотосинтеза и долю живых клеток в накопительной культуре традиционного растительного тест-объекта зелёной водоросли *Scenedesmus quadricauda*. Наши и литературные данные показывают, что одна из возможных причин стимуляции роста и эффективности фотосинтеза водорослей связана с антиоксидативными и мембранотропными свойствами фуллеренов. Показан значимый стимулирующий эффект на изменение численности клеток и эффективность фотосинтеза. В присутствии 10 мг/л фуллерена C_{60} или C_{70} в питательной среде стимуляция величины эффективности фотосинтеза культуры составляла соответственно до 25 и 14% по сравнению с контролем, а концентрации 1 и 5 мг/л не оказали достоверного воздействия. При этом при воздействии 10 мг/л фуллерена C_{60} и C_{70} численность клеток водоросли увеличивалась на 27 и 20% соответственно, а при 5 мг/л фуллерена C_{60} стимулирующий эффект был менее выражен. При добавлении в среду как фуллерена C_{60}, так и фуллерена C_{70}, в диапазоне исследованных концентраций 1, 5 и 10 мг/л в процессе опыта клетки оставались жизнеспособными, при этом доля живых клеток была на уровне контроля (98–99%).

Ключевые слова: фуллерен C_{60}, фуллерен C_{70}, *Scenedesmus quadricauda*, эффективность фотосинтеза, численность клеток.

The effect of fullerenes C_{60} and C_{70} on the growth and photosynthesis of the algae culture *Scenedesmus quadricauda*

© 2021. G. A. Dallakyan ORCID: 0000-0003-2477-7477, **V. I. Ipatova** ORCID: 0000-0002-7035-6913, **I. V. Mikheev** ORCID: 0000-0002-2383-1697, **A. M. Lazareva** ORCID: 0000-0002-5596-5593, **S. I. Poghosyan** ORCID: 0000-0002-1773-2014,
Lomonosov Moscow State University,
119234, Russia, Moscow, Leninskie Gory, 1–12,
e-mail: honaris@bk.ru

Because of the increasing production of fullerenes and the likelihood of their release into the environment, studies of the effects of their impact on biological systems, on aquatic organisms, are becoming especially relevant. The effects of the action of an aqueous dispersion of fullerenes C_{60} and C_{70} at concentrations of 1, 5, and 10 mg/L on the cell number, the efficiency of photosynthesis, and the proportion of living cells in the culture of a traditional test object *Scenedesmus quadricauda* are described. Our and published data show that one of the possible reasons for stimulating the growth and efficiency of photosynthesis of algae is associated with the antioxidative and membranotropic properties of fullerenes. A significant stimulating effect on the change of the cell number and the efficiency of photosynthesis is shown during the experiment. In the presence of 10 mg/L fullerene C_{60} or C_{70}, the stimulation of the photosynthesis efficiency of the culture was up to 25 and 14%, respectively, compared to the control, and concentrations of 1 and 5 mg/L did not cause a significant effect. At the same time, when exposed to 10 mg/L of fullerene C_{60} and C_{70}, the cell number increased by 27 and 20%, respectively, and with 5 mg/L of fullerene C_{60}, the stimulating effect was less expressed. When both fullerene C_{60} and fullerene C_{70} were added to the medium, in the range of 1–10 mg/L, the cells remained viable during the experiment, while the proportion of living cells was at the control level (98–99%).

Keywords: fullerene C_{60}, fullerene C_{70}, *Scenedesmus quadricauda*, photosynthesis efficiency, cell number.

Производство фуллеренов неуклонно возрастает, начиная с 1990 г. В настоящее время объём производства фуллереновой сажи составляет несколько тонн в год. Для научно-практических целей используют стабильные, высококонцентрированные водные дисперсии

фуллеренов (ВДФ C_{60} и C_{70}). Они представляют собой коллоидные растворы с размером частиц до 200 нм [1].

Водорастворимые фуллерены C_{60} и C_{70} – это молекулярные соединения, состоящие из 60 и 70 углеродных атомов, широко используемые в физических, химических, медицинских и биологических исследованиях в связи с их донорно-акцепторными и антиоксидативными свойствами. Благодаря своей уникальной геометрической форме и электронной структуре, фуллерены и их производные рассматриваются в качестве основы для получения новых эффективных лекарственных средств. В настоящее время как применение, так и исследование фуллеренов сдерживаются их высокой стоимостью, которая связана с низкой экономической эффективностью технологий получения и самих фуллеренов, и их производных. Однако, в связи с высокой вероятностью попадания фуллеренов в окружающую среду, особенно актуальной становится задача исследования эффектов их воздействия на биологические системы, в частности, – на водные организмы.

Изучение биологических свойств производных фуллеренов показало, что они способны проникать через биомембраны клетки, благодаря их липофильности, и обладают следующими видами активности: антиоксидантной, антибактериальной, противораковой, радиозащитной, мембранотропной, а также могут служить ингибиторами биосинтеза белков [2].

Водоросли являются важным компонентом водных экосистем, неотъемлемым звеном трофических цепей в водных сообществах. Водные организмы в ходе своей предшествующей эволюции никогда не сталкивались со многими синтезированными человеком веществами, в том числе и с ВДФ, поэтому не исключена постепенная аккумуляция фуллеренов в водоёмах, что может иметь непредсказуемые последствия для водной экосистемы в целом [3]. К настоящему времени проведены многочисленные исследования воздействия ВДФ C_{60} на водные микроорганизмы и ракообразных, однако их результаты носят противоречивый характер. Известны работы, в которых показано наличие токсичных свойств у ВДФ C_{60} при их экспонировании с бактериальными культурами штаммов *Escherichia coli* K-12 и *E. coli* B-23 [4, 5]. В то же время имеются исследования об отсутствии угнетающего действия фуллеренов на *E. coli*, *Saccharomyces cerevisiae* и почвенные микроорганизмы [6, 7]. Есть данные о стимулирующем воздействии фуллеренов на микробиоценоз сточных вод и рост растений [8, 9].

В связи с этим целью настоящей работы было исследование влияния ВДФ C_{60} и C_{70} в концентрациях 1, 5 и 10 мг/л на биологические показатели в накопительной культуре водоросли *Scenedesmus quadricauda*.

Объекты и методы исследования

Тест-объектом исследования служила альгологически чистая культура зелёной хлорококковой микроводоросли *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. (=*Desmodesmus communis* (E. Hegew.) E. Hegew.), широко распространённая в пресных водоёмах Южного и Северного полушария и являющаяся важным звеном в трофических цепях.

S. quadricauda получена из коллекции культур водорослей кафедры микробиологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (DMMSU, штамм S-3). Данный вид водорослей относится к ценобиальным организмам. Чаще встречаются 2- и 4-клеточные ценобии, реже – 8–16-клеточные. При размножении в каждой клетке образуются автоспоры, которые внутри материнской клетки слагаются в молодую колонию. Данный вид широко используется при биотестировании качества водной среды в мировой практике.

Культуру выращивали на среде Успенского № 1 (состав, г/л: 0,025 KNO_3, 0,025 $MgSO_4$, 0,1 KH_2PO_4, 0,025 $Ca(NO_3)_2$, 0,0345 K_2CO_3, 0,002 $Fe_2(SO_4)_3$; pH 7,0–7,3 ед.) в люминостате при освещённости 3 клк со сменой дня и ночи (12 : 12 ч), температуре 22±2 °C и перемешивали 2 раза в сут во избежание оседания клеток.

Действие фуллеренов C_{60} и C_{70} на культуру *S. quadricauda* оценивали при концентрациях 1, 5 и 10 мг/л. Опыты длительностью 17 сут проводили в конических колбах ёмкостью 100 мл, в которые добавляли 50 мл среды, в трёх повторностях для каждой концентрации и контроля.

Биотестирование проводили, руководствуясь рекомендациями, описанными в литературе [10, 11], используя как общепринятые интегральные показатели, так и физиологические показатели состояния культуры.

Основными показателями для оценки состояния культуры служили изменение численности клеток, соотношения живых и мёртвых клеток, эффективности фотосинтеза в динамике её развития.

Численность клеток подсчитывали в камере Горяева под световым микроскопом, все повторности каждой концентрации подсчитывали по 4 раза. Определение живых и мёртвых клеток в культурах осуществляли с помощью

люминесцентного микроскопа Axioscop 2 FSPlus (CarlZeiss, Германия) на препарате «раздавленная капля» в камере Горяева, подсчитывая по 200 клеток в каждой повторности каждой концентрации. При облучении объекта коротковолновым сине-фиолетовым светом и наблюдали длинноволновое видимое свечение объекта: живые клетки имели ярко-красное свечение, отмирающие – от оранжевого до жёлтого, а мёртвые – зелёное.

Функциональное состояние водорослей измеряли по эффективности работы их фотосинтетического аппарата на импульсном флуориметре «МЕГА-25» (Россия, МГУ). На основании измерений интенсивностей флуоресценции хлорофилла при открытых (F_o) и закрытых (F_m) реакционных центрах фотосинтетического аппарата определяли эффективность фотосинтеза суспензии водорослей по безразмерному параметру $(F_m - F_o)/F_m$ [12].

Получение водной дисперсии фуллерена C_{60} и C_{70} проводили по методике замены растворителя – толуола на воду с помощью ультразвука [13]. В работе использовали коммерчески доступный образец C_{60} и C_{70} (ООО «НеоТекПродакт», Россия). Отсутствие функционализации поверхности доказывали с помощью метода МАЛДИ-МС (матричноактивированная лазерная десорбция/ионизация). Содержание остаточного толуола и летучих органических компонентов в дисперсиях фуллерена контролировали с помощью статического парофазного газохроматографического анализа, содержание этих примесей не превышало 0,1 мкг/л. Средний кластер фуллерена составил 130±5 нм с величиной электрокинетического потенциала – 33,2±0,5 мВ (измерения проводили в среде деионизованной воды). С помощью атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно- связанной плазмой установлено, что содержание в дисперсии As составляло не более 5 мкг/л, а Pb, Cd, Zn и Cu – не более 1 мкг/л. Работы по получению ВДФ C_{60} и C_{70} были выполнены на кафедре аналитический химии химического факультета МГУ.

Результаты опытов статистически обработаны с использованием критерия Стьюдента. Оценку токсического действия проводили на основании достоверности различий опытных значений по сравнению с контролем при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Численность клеток *S. quadricauda* во всех пробах с фуллереном C_{60} во время роста культуры была на уровне или выше, чем в контроле (рис. 1). Начиная с 10 сут опыта, отмечена достоверная стимуляция роста тест-культуры в пределах 8–12% при 5 мг/л и 12–27% при 10 мг/л фуллерена C_{60}. А в присутствии 1 мг/л рост культуры находился на уровне контроля на протяжении всего опыта.

При концентрации 10 мг/л фуллерена C_{60}, начиная с 3-х сут роста культуры, величина эффективности фотосинтеза увеличивалась и достигала максимума на 14 сут (20% по отношению к контролю), а при концентрациях 1 и 5 мг/л достоверных различий не обнаружено (рис. 2).

Таким образом, фуллерен C_{60} оказывает стимулирующие действие как на изменение численности клеток водоросли, так и на величину эффективности фотосинтеза.

Влияние фуллерена C_{70} на численность клеток было исследовано в таком же диапазоне концентраций (1–10 мг/л) (рис. 3). Концентрации 1 и 5 мг/л не оказали значимого влияния на изменение численности клеток. А при 10 мг/л в процессе роста наблюдали достоверную стимуляцию роста культуры на 4–20%, начиная с 3-х сут опыта.

При концентрации 10 мг/л фуллерена C_{70}, начиная с 3-х сут роста культуры, эффективность фотосинтеза увеличивалась и достигала своего максимума (14% по отношению к контролю) на 14 сут роста (рис. 4), а в концентрациях 1 и 5 мг/л достоверных различий по эффективности фотосинтеза не обнаружено. Полученные данные по действию фуллеренов на величину эффективности фотосинтеза во время роста культуры свидетельствуют о том, что действие фуллерена C_{70} слабее, чем фуллерена C_{60}.

Таким образом, данные по численности клеток хорошо согласуются с данными по эффективности фотосинтеза.

Результаты исследования жизнеспособности клеток *S. quadricauda*, оценённой с помощью метода люминесцентной микроскопии, при добавлении в среду в диапазоне исследованных концентраций 1–10 мг/л как фуллерена C_{60}, так и фуллерена C_{70}, показали, что на протяжении двух экспериментов в контроле доля мёртвых клеток составляла всего 1–2%, а во всех опытных образцах была на уровне контроля.

Заключение

Таким образом, разными методами, используя различные показатели состояния, изучаемого тест-объекта, было показано, что добавка фуллеренов C_{60} и C_{70} в среду культивирования приводит к лучшему росту культуры *S. quadricauda* как по интегральному

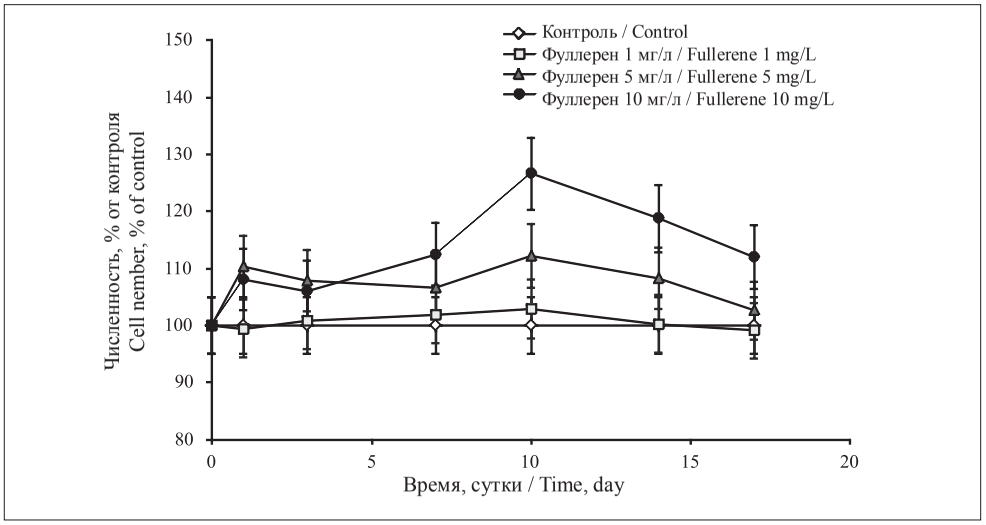


Рис. 1. Изменение относительной численности клеток культуры *Scenedesmus quadricauda* в процессе роста в присутствии фуллерена C_{60} / **Fig. 1.** Change in the relative cell number in the presence of fullerene C_{60} during the growth of the culture *Scenedesmus quadricauda*

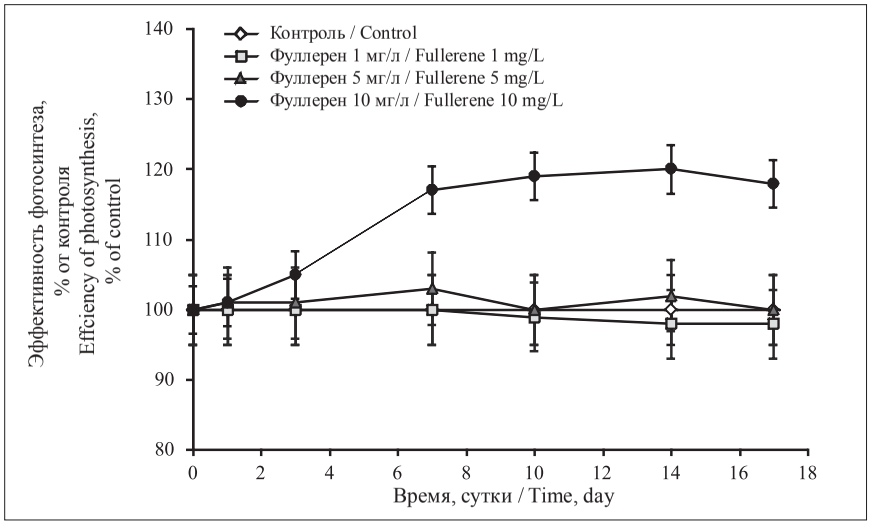


Рис. 2. Влияние фуллерена C_{60} на эффективность фотосинтеза (F_v/F_m, %) в процессе роста культуры *Scenedesmus quadricauda*
Fig. 2. The effect of fullerene C_{60} on the efficiency of photosynthesis (F_v/F_m, %) during the growth of the culture *Scenedesmus quadricauda*

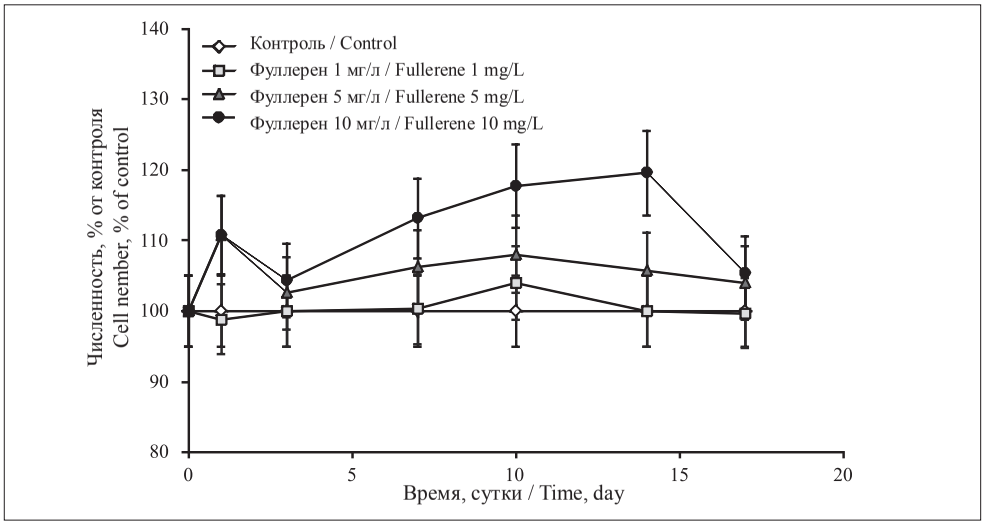


Рис. 3. Изменение относительной численности клеток культуры *Scenedesmus quadricauda* в процессе роста в присутствии фуллерена C_{70} / **Fig. 3.** Change in the relative cell number in the presence of fullerene C_{70} during the growth of the culture *Scenedesmus quadricauda*

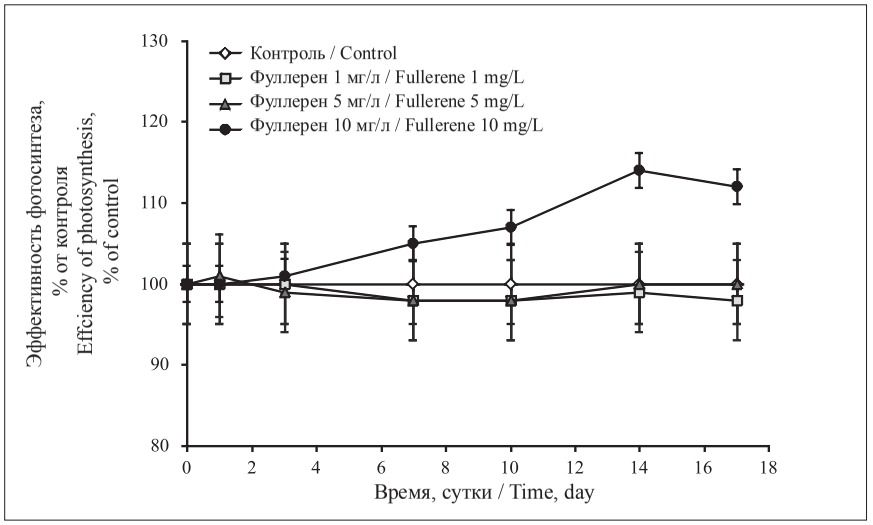


Рис. 4. Влияние фуллерена C_{70} на эффективность фотосинтеза (F_v/F_m, %) в процессе роста культуры *Scenedesmus quadricauda*
Fig. 4. The effect of fullerene C_{70} on the efficiency of photosynthesis (F_v/F_m, %) during the growth of the culture *Scenedesmus quadricauda*

общебиологическому показателю – численности клеток, так и по функциональному показателю – величине эффективности фотосинтеза, характеризующему физиологическое состояние изучаемого тест-объекта. При этом фуллерен C_{60} оказывает более сильное стимулирующее действие на рост культуры, уже начиная с концентрации 5 мг/л, в отличие от фуллерена C_{70}, который оказывает стимулирующее действие при концентрации 10 мг/л.

На основании данных литературы можно предположить, что одна из возможных причин стимуляции роста водорослей связана с антиоксидативной активностью фуллеренов [2], которые стабилизируют свободнорадикальные процессы в клетке и инактивируют активные формы кислорода, образующиеся в среде культивирования во время роста культуры. Кроме того, фуллерены, проникая в клетку благодаря своим мембранотропным свойствам [9], по-видимому, влияют на темп деления клеток, способствуя усиленному росту клеток водорослей. Ранее в нашей работе было показано, что фуллерен C_{60} стимулировал рост природного и аквариального бактериопланктона [2]. Стимуляция бактериальной флоры в питательной среде может также способствовать росту клеток водорослей.

Необходимы дальнейшие биохимические исследования влияния фуллеренов на рост водорослей для установления возможных причин их благоприятного воздействия на первичное звено водных экосистем. Проведение биотестирования вновь синтезированных веществ и соединений на стандартных тест-объектах с целью установления их токсичности или стимуляции роста позволит в будущем защитить водные экосистемы от их загрязнения.

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания «Закономерности формирования качества воды, биоиндикация и оценка экологической безопасности водной среды» (№ ЦИТИС: АААА-А16-116021660054-4) и государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, часть 2 (тема № АААА-А16-116021660047-6).

References

1. Duncan L.K., Jinschek J.R., Vikesland P.J. C_{60} colloid formation in aqueous systems: effects of preparation method on size, structure, and surface charge // Environmental Science & Technology. 2008. V. 42. No. 1. P. 173–178. doi: 10.1021/es071248s

2. Dumpis M.A., Nikolaev D.N., Litasova E.V., Ilyin M.A., Brusina L.B. Biological activity of fullerenes – realities and prospects // Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoy terapii. 2018. V. 16. No. 1. P. 4–20 (in Russian). doi: 10.17816/RCF1614-20

3. Mosharova I.V., Dallakyan G.A., Mikheev I.V., Il'inskii V.V., Akulova A.Yu. Changes in the quantiative and functional characteristics of bacterioplankton under the influence of aqueous unmodified fullerene C_{60} dispersions // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2019. V. 487. No. 2. P. 217–222. doi: 10.31857/S0869-56524872217-220

4. Aquino A., Chan J., Giolma K., Loh M. The effect of a fullerene after suspension on the growth, cell viability, and membrane integrity of *Escherichia coli* B23 // Jounal of Experimental Microbiology and Immunology. 2010. V. 14. P. 13–20.

5. Chae S.R., Wang S.Y., Hendren Z.D., Wiesner M.R., Watanabe Y., Gunsch C.K. Effects of fullerene nanoparticles on *Escherichia coli* K12 respiratory activity in aqueous suspension and potential use for membrane biofouling control // Journal of Membrane Science. 2009. V. 329. No. 1–2. P. 68–75. doi: 10.1016/j.memsci.2008.12.023

6. Hadduck A., Hindagolla V., Contreras A., Li Q., Bakalinsky A.T. Does aqueous fullerene inhibit the growth of *Saccharomyces cerevisiae* or *Escherichia coli* // Applied and Environmental Microbiology. 2010. V. 76. No. 24. P. 8239–8242. doi: 10.1128/AEM.01925-10

7. Tong Zh-H., Bischoff M., Nies L., Carroll N.J., Applegate B., Turco R. Influence of fullerene (C_{60}) on soil bacterial communities: aqueous aggregate sixe and solvent co-introduction effects // Scientific Reports. 2016. V. 6. Article No. 28069. doi: 10.1038/srep28069

8. Huang F., Ge L., Zhang B., Wang Y., Tian H., Zhao L., He Y., Zhang X. A fullerene colloidal suspension stimulates the growth and denitrification ability of wastewater treatment sludge-derived bacteria // Chemosphere. 2014. V. 108. P. 411–417. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.02.042

9. Panova G.G., Kanash E.V., Semenov K.N., Charykov N.A., Khomyakov Yu.V., Anikina L.M., Artemyeva A.M., Kornyukhin D.L., Vertebny V.E., Sinyavina N.G., Udalova O.R., Kulenova N.A., Blokhina. S.Yu. Derivatives of fullerene stimulate the production process, growth and resistance to oxidative stress in plants of wheat and barley // Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2018. V. 53. No. 1. P. 38–49 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.38eng

10. Fokina A.I. The use of physiological and biochemical reactions of microorganisms on the action of toxicants in bioassay // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 3. P. 4–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-004-015

11. Olkova A.S. Modern trends in the development of bioassay methodology of aquatic environments // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 3. P. 19–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-019-026

12. Pogosyan S.I., Galchuk S.V., Kazimirko Yu.V. Konyukhov I.V., Rubin A.B. The use of a MEGA-25 fluorimeter to determine the amount of phytoplankton and assess the state of its photosynthetic apparatus // Voda: khimiya i ekologiya. 2009. No. 6. P. 34–40 (in Russian).

13. Mikheev I.V., Khimich E.S., Rebrikova A.T., Volkov D.S., Proskurnin M.A., Korobov M.V. Quasi equilibrium distribution of pristine fullerenes C_{60} and C_{70} in a water-toluene system // Carbon. 2017. V. 111. P. 191–197. doi: 10.1016/j.carbon.2016.09.065

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-198-204

Studies of the toxic effect of heavy metals contained in contaminated soil on the germination and growth of higher plants

© 2021. M. K. Mladenov, PhD, associate professor ORCID: 0000-0002-8548-1856,
S. A. Yaneva, PhD, associate professor ORCID: 0000-0002-0291-1698,
N. G. Rangelova, PhD, associate professor ORCID: 0000-0003-2601-7145,
University of Chemical Technology and Metallurgy,
8 bul., "St. Kliment Ohridski", Sofia, Bulgaria, 1756,
e-mail: mladenov@uctm.edu

It is well known that the most of the heavy metals can give rise to rather well-defined toxic effects in human. They damages: the lungs in the form of pneumoconiosis; the central nervous system; the cardiovascular system; the immune system and others. Contaminated soils are the main source of heavy metals in food chains and ultimately for humans. For this reason, it is necessary to look for opportunities for the treatment of such contaminated soils, in order to enable their safe practical application. In this connection, data from the effect of contaminated with heavy metals soil on the growth and development of higher plants, through the application of pot-tests, when mixed with reference soil and compost, are presented here. Two species of higher plants were used in the study – oats (*Avena sativa*) and alfalfa (*Medicago sativa*). The obtained results show that the degree of growth and development of the experimental plants of the two plant species, are directly connected with the amount of added contaminated soil. To a greater extent, a toxic effect was found at alfalfa (*Medicago sativa*), where the test soil leads to complete suppression of germination.

Keywords: toxic effect, waste earth masses, oat *(Avena sativa)*, alfalfa (*Medicago sativa*), pot-tests.

УДК 631.45

Исследования токсического эффекта тяжёлых металлов, содержащихся в загрязнённой почве, на всхожесть и рост высших растений

© 2021. М. К. Младенов, доктор философии, доцент,
С. А. Янева, доктор философии, доцент,
Н. Г. Рангелова, доктор философии, доцент,
Химико-технологический и металлургический университет,
1756, Болгария, г. София, бул. «Св. Климент Охридский», д. 8,
e-mail: mladenov@uctm.edu

Известно, что большинство тяжёлых металлов (ТМ) и металлоидов могут вызывать у человека определённые токсические эффекты. В результате их воздействия происходят повреждение лёгких, центральной нервной, сердечно-сосудистой, иммунной систем и др. Загрязнённые почвы являются основным источником ТМ в пищевых цепях и, в конечном итоге, для человека. Поэтому необходимо искать варианты обработки таких загрязнённых почв, чтобы обеспечить их безопасное практическое применение. В этой связи в настоящей работе представлены данные о влиянии почвы, загрязнённой ТМ, на рост и развитие высших растений посредством проведения лабораторного горшечного теста при смешивании эталонной почвы с компостом. В настоящем исследовании использованы два вида высших растений – овёс посевной (*Avena sativa* L.) и люцерна посевная (*Medicago sativa* L.). Полученные результаты показывают, что степень роста и развития экспериментальных растений двух видов напрямую зависит от количества добавленной загрязнённой почвы. В большей степени токсический эффект был обнаружен у люцерны, для которой исследуемая почва приводит к полному подавлению прорастания семян.

Ключевые слова: токсическое действие, почва, овёс (*Avena sativa* L.), люцерна (*Medicago sativa* L.), лабораторный горшечный тест.

Heavy metals cause one of the most dangerous soil contamination, as they are sorbed and "caught" firmly in the soil complex, forming metal salts of organic acids that remain in the surface layer. From there, the risk of damage to plants and organisms inhabiting that layer, and subsequently to humans, increases. Once in the human body, heavy metals are difficult to be removed. They are able to accumulate and may have toxic effects since they are not disposed out of human body by natural physiological mechanisms. For example: exposure to metals or their compounds damages the lungs in the form of pneumoconiosis, may have serious effects on the central nervous system, on the cardiovascular system, may also affect the immune system and others [1, 2].

According [3], over 5 million sites are considered as soil polluted and contaminated with heavy metals. For that reason, it is necessary to look for opportunities for the treatment of such contaminated soils, in order to enable their safe practical application. In soil practice, two main techniques are applied to study the effect of various soils and substances on plant growth and development: one is the technique of the field-test used by a number of authors in their studies [4, 5] and the second technique is the so-called pot-test.

The method of pot-test is one of the most common and is used to study changes in the content and forms of nutrients, the effectiveness of different types of fertilizers and improvers, etc. Also, it allows many soil differences to be studied simultaneously, which is why it is used more widely. In this type of experiment, the plants are grown in pots in specially adapted vegetation houses or greenhouses under controlled conditions in terms of moisture, heat, light, air and fertilize, they are protected from birds and are completely isolated from natural phenomena. Under such conditions, the reliability of the obtained results increases and at the same time the duration of the study is decreased. A number of authors have successfully applied the pot-tests in conducting their research on the study of various factors and substances and their impact on various plants [6–8].

In the practice, there are also standard procedures that aim to support the process of testing the effects of various substances and pollutants on the biological species – mainly plant species (ISO 17126:2005, ISO 11269-1:2012). Such is the standard ISO 11269-2:2012 whose basic principles and rules were applied in performing of the current experimental work.

The aim of the present study was to evaluate the toxic effect of heavy metal contaminated waste earth masses on the growth and development of higher plants.

Objects and methods

Sampling and analyses. For the purpose of the experiments, waste earth masses from a non-ferrous metal mine used as test soil (TS) were sampled. The samples are air-dried, sieved through a 4 mm sieve and homogenized. To interpret the test results, some basic characteristics were characterized: pH (KCl) – in accordance with Bulgarian State Standard (BSS) ISO 10390:2011; water content – according to ISO 11465:1993; cation exchange capacity – according to BSS ISO 11260:2018; total carbon content – according to ISO 10694:1995; content of nitrogen and phosphorus (BSS ISO 11261:2002, BSS ISO 11263:2002). The content of the elements Cu, Co, Ni, Zn, Al, Pb, Cr, Sn, Bi, Mn, Fe, Cd and As was determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (Prodigy Teledyne, Leeman Labs) (Bulgarian State Standard EN 16170:2016).

According to the recommendations of ISO 11269-2:2012, a reference soil (RS) from an uncontaminated area near the contaminated site was used as a control. That soil also was treated as the test soil and its basic characteristics were also characterized.

Pot-tests. For the purposes of the experiment, TS was tested in a single concentration (100%), and the toxicity assessment was performed in a multi-concentration test in which series of concentrations were prepared by mixing certain amounts of test soil with reference soil and/or compost (Table 1). For comparison, a series only from the reference soil (0%) was prepared.

For the pot-tests, non-porous plastic pots with an inner diameter of 90 mm, were used. They were filled 1 cm below the upper edge, and the seeds were sown immediately after filling the pot. According to standard ISO 11269-2:2012 in each pot 10 seeds of the selected monocotyledonous species were planted – oats (*Avena sativa* L.) and dicotyledonous – alfalfa (*Medicago sativa* L.). After filling the pots, an optimal amount of distilled water was added to them, which quantities was controlled during the test. Three parallel tests were prepared for each series, for each plant species.

To avoid masking the phytotoxic effect by nutrient deficiency, after the emergence of sprouts all plants are enriched with conventional

Table 1

Contents of the initial materials, in %

Name	Contents of:		
	test (contaminated) soil (TS)	reference soil (RS)	compost
RS (0%)	0	100	0
Mixture 1	25	75	0
Mixture 2	50	50	0
Mixture 3	25	50	25
Mixture 4	50	25	25
Mixture 5	50	0	50
TS (100%)	100	0	0

commonly available mineral fertilizer – 2% ammonium nitrate solution (NH_4NO_3). After the appearance of the plants in each pot, their number has been reduced, leaving a total of five evenly spaced representative plants in the pot.

The pot-tests were conducted in the period 13.07–05.08.2020 under the following conditions: temperature 18–22 °C, humidity of air – 75–80% and soil moisture – 70–75%. During the experiment, the parameters total number of plants and stem height were monitored, and after termination of the experiment, the obtained dry mass was measured.

Results and discussion

The results for the composition of the compost from municipal waste used in the experimental work are described in detail in [9]. The results obtained from the preliminary analyses of the test (TS) and reference (RS) soil are given in Table 2.

The results for the determined heavy metal contents in the test soil are given in Table 3.

According to [10] the content of copper in the soil on industrial and production sites must not exceed 500 mg/kg. The copper content in the tested soil sample (16.84 mg/kg) is many times lower than the value for the MAC (maximum admissible concentration). In the same Regulation No. 3, the MACs for the elements Cd, Zn, Ni, Cr, Pb and As are also established, and for all of them the obtained values are below the MAC values, even for the last two they are below the detection limits of the apparatus, respectively < 0.010 mg/kg. Values for the next elements,

Table 2

Results from preliminary analysis of the soils

Parameter	TS	RS
Moisture content, %	2.34±0.01	3.93±0.01
P_{total}, %	0	0.038±0.002
$P_{soluble\ forms}$, %	0	0.009±0.001
C_{total}, %	0	8.95±0.01
Cation exchange capacity, meq per 100 g soil	1.19±0.02	20.43±0.04
pH_{KCl}	3.19±0.01	4.57±0.01
N_{total}, %	0	0.29±0.01

Table 3

Values for heavy metal content in TS

Element	Concentration, mg/kg
Cu	16.8±0.9
Co	0.378±0.019
Ni	0.069±0.007
Zn	0.717±0.032
Al	246±5
Cr	0.438±0.007
Mn	9.56±0.06
Fe	608±5

Table 4

Observation of the number of plants of oat (*Avena sativa*)

Day of observation	RS	Mix. 1	Mix. 2	Mix. 3	Mix. 4	Mix. 5	TS
	Number of plants*						
3	10	6	10	7	8	4	0
4	10	7	10	10	10	9	7
From 5 to 23	5	5	5	5	5	5	5

*Note: * The values are arithmetic-mean and are rounded to the nearest whole number.*

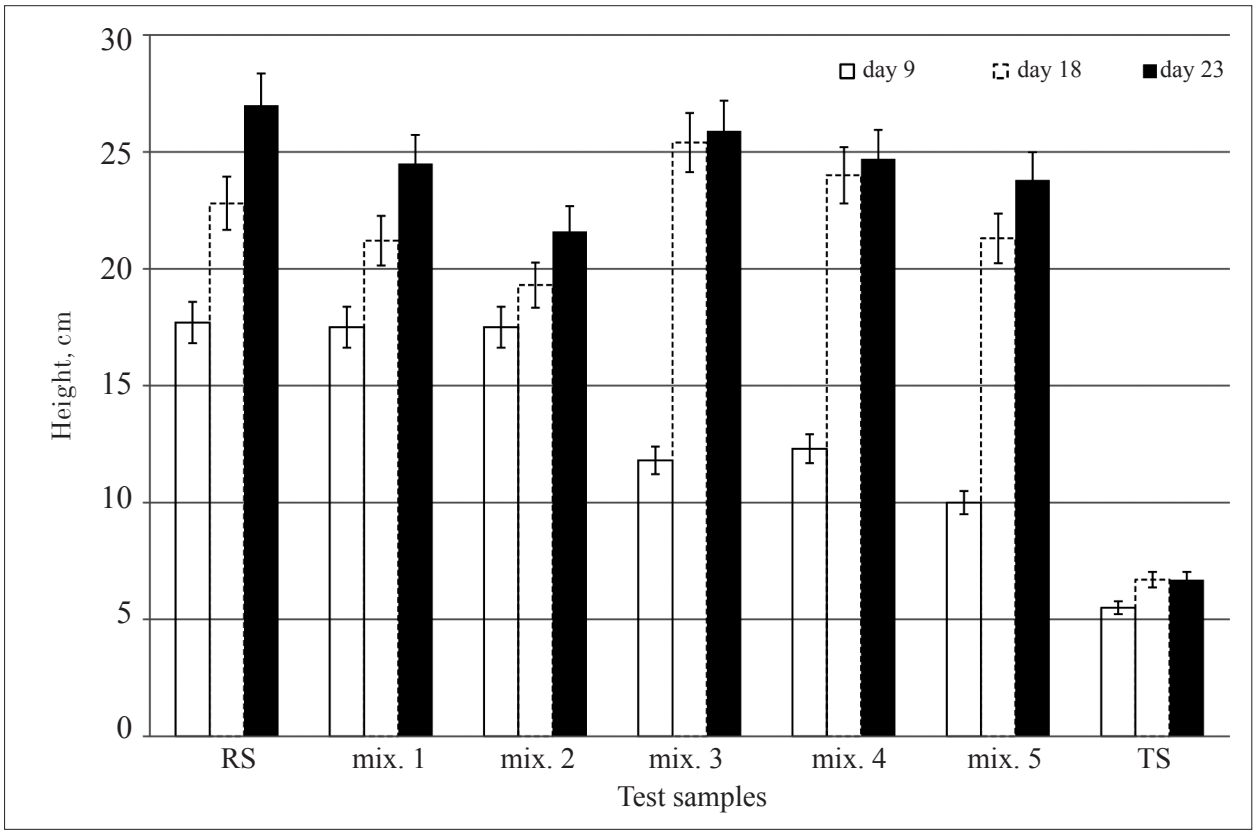


Fig. 1. Alteration of the height of the oat (*Avena sativa*) plants

also have been established below the detection limits of the apparatus: Sn < 0.010 mg/kg; Bi < 0.020 mg/kg; and Cd < 0.005 mg/kg.

The validity of the conducted pot-tests was confirmed by the fulfillment of the criteria set in ISO 11269-2:2012 regarding the comparative soil (RS): the appearance of seven healthy plants in each pot; lack of visible phytotoxic effects (chlorosis, necrosis, wilting, deformations of the leaves and stems) in plants; average survival of the emerged seedlings – at least 90% during the study.

The results from observation of the emergence and alteration of oat plants, are given in Table 4.

Table 4 shows the values from observing the emergence and alteration of oats, reported from the first to the twenty-third day after planting the seeds. After reaching the required germination on the fourth day of planting the seeds, the number of experimental plants was reduced to five per pot. Tracking the number of sprouted oat plants shows that the effect of the concentration of pollutants in the studied soils (RS, TS) and soil mixtures does not lead to a change in their number.

Figure 1 shows the growth in height (in cm) of oat plants during the experiment.

The values presented in Figure 1 show that as the concentration of contaminated soil in the mixtures increases, the height of the plants decreases – at 100% contaminated soil on day 9, the measured height is 5.5 cm, and on day 18 it reaches 6.7 cm and until the end of the experiment on 23rd day, does not change. The highest value for the height of oats during the whole experiment was found in the comparative soil, respectively on the 9th

day – 17.7 cm, on the 18th day – 22.8 cm and on the 23rd day – 27 cm.

The results for the different mixtures show that the addition of real living soil (RS) and organic material leads to a clear effect on the growth of oat plants – mixture 3, shows the best values compared to other mixtures. It was established that the main substantial effect on the growth of oat plants has been obtained by addition of reference soil.

The pot-tests for both plant species were finished on day 23, after which the plants were uprooted and the yield of the respective series of experimental plants was weighted (see Tables 5 and 7) after drying in an oven at 75 °C for 16 hours.

It was found that with increasing concentration of contaminated soil (TS) in the mixtures without compost, oat yield decreases, the order is as follows: RS (0%) > mixture 1 > mixture 2. In the mixtures with compost, it is observed that with decreasing content on RS in them the yield also decreases – the order of yield is: mixture 3 > mixture 4 > mixture 5 > RS. From the values given in Table 5 it can be seen that the weight of the dry mass of oats, obtained during cultivation in the TS (100%), is lowest – 0.097 g.

The summary of the results for oats (*A. sativa*) shows that the amount of contaminated soil (TS) added affects it's growth and development, although no change in the number of experimental plants was observed until the end of the pot-tests.

In Table 6, the results from observation of the emergence and alteration of alfalfa plants, are presented.

The results show that on the third day after planting the alfalfa, the number of sprouted plants reaches the requirements of ISO 11269-2 (70 to 100%). After reaching the required germination, the number of experimental plants was reduced to five per pot, on the fifth day after planting the seeds. The observations of the alteration of the alfalfa plants (Table 6) shows that the different content of contaminated soil (TS) in the prepared mixtures affects their growth and leads to a reduction in their number. Changes in the number of plants were reported in all experimental mixtures and on the last day of the pot-test in the RS. Lack of germination was also found in the seeds planted in the TS throughout the test period.

The highest percentage of reduction in the number of plants was reported in mixture 2, where at the end of the test one specimen per pot, was found. The results show that in the mixtures with the addition of compost the reduction in the number of plants is smaller, compared to the mixtures of test and reference soil. It should be noted that when comparing the mixtures containing compost, the most significant reduction in the number of plants is observed in mixture 3, which has the lowest content of contaminated soil. A closer examination of the composition of the mixtures shows that such a significant reduction in the number of plants is also observed in mixtures 1 and 2. All three mixtures are characterized by a low content of organic materials and a predominant content of soil mineral component. That probably leads to a synergistic effect between two factors: optimal supply of nutrients in the soil solution, which enhances the absorption of the ions of the heavy metals from the root system of plants; and the absence of enough quantity of

Table 5

Obtained dry mass oat (*Avena sativa*)

Experimental series	RS	Mix. 1	Mix. 2	Mix. 3	Mix. 4	Mix. 5	TS
Weight, g	0.304	0.243	0.203	0.745	0.622	0.661	0.097

Table 6

Observation of the number of plants of alfalfa (*Medicago sativa*)

Day of observation	RS	Mix. 1	Mix. 2	Mix. 3	Mix. 4	Mix. 5	TS
	Number of plants*						
3	8	9	9	8	8	5	0
4	10	9	10	9	9	7	0
From 5 to 8	5	5	5	5	5	5	0
9 and 10	5	5	5	5	5	4	0
From 12 to 14	5	5	5	4	5	4	0
From 15 to 18	5	5	3	4	5	4	0
From 21 to 23	5	4	2	3	5	4	0

*Note: *The values are arithmetic-mean and are rounded to the nearest whole number.*

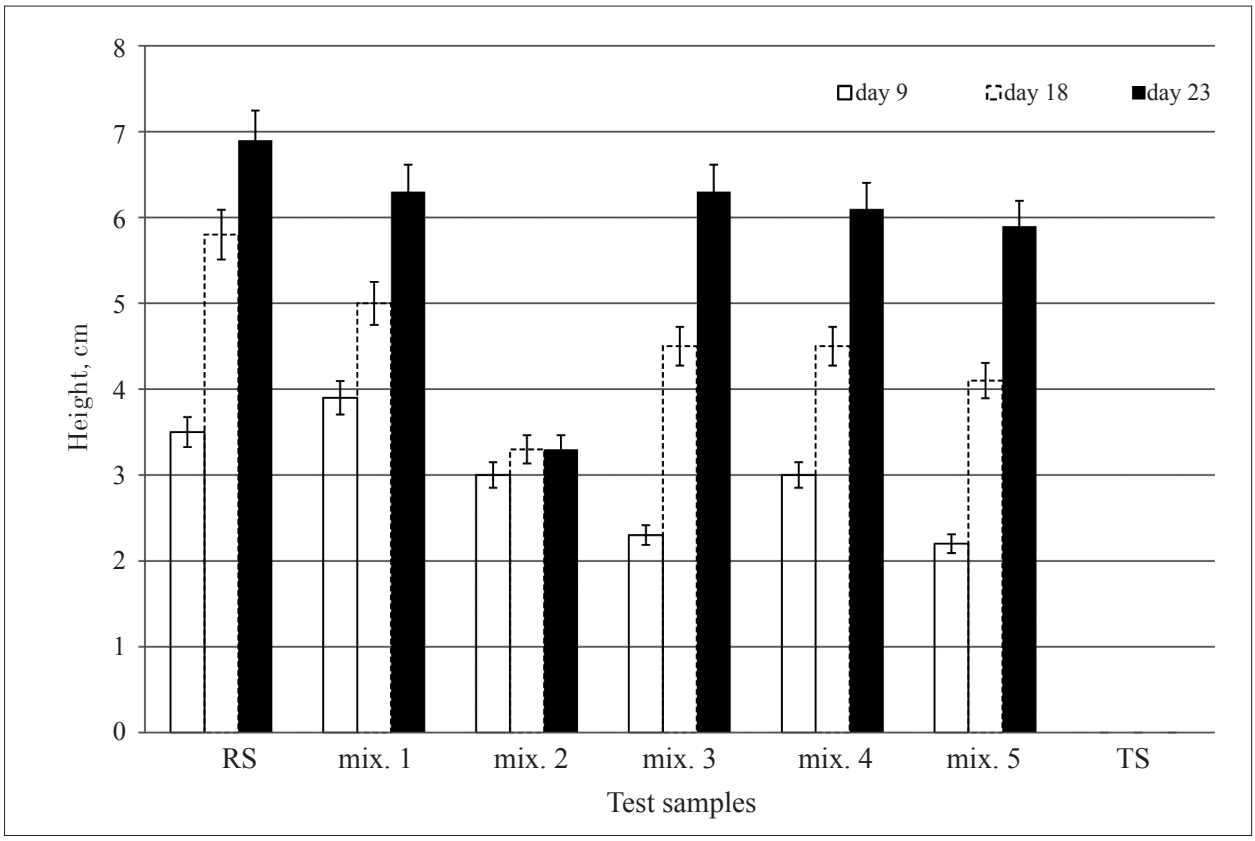


Fig. 2. Alteration of the height of the alfalfa (*Medicago sativa*) plants

Table 7

Obtained dry mass alfalfa (*Medicago sativa*)

Experimental series	RS	Mix. 1	Mix. 2	Mix. 3	Mix. 4	Mix. 5	TS
Weight, g	0.057	0.062	0.029	0.072	0.071	0.048	–

organic substances in the soil system available to block the available heavy metals in the form of metal salts of the organic acids.

On Figure 2 it is shown the growth in height of alfalfa plants. The highest value for the height of the alfalfa plants, again as with oats, was found in the reference soil (RS), respectively on the 9th day – 3.9 cm, on the 18th day – 5.8 cm and on the 23rd day – 6.9 cm. The highest initial value was found in mixture 1, which also has the highest content of RS – respectively 75%, which is most likely a carrier of mobile forms of nutrients and after their depletion a growth retardation was established.

In contrast to oats, in the alfalfa plants, the values obtained for the different mixtures show that the addition of organic material (compost) leads to a clear effect on the growth of alfalfa plants, and most likely the effect of adding a real natural soil (RS) would be significant at certain ratios (higher than those in mixture 2).

The obtained weights for the dry mass from alfalfa plants, are show in Table 7. The values of alfalfa dry mass are directly related to the number of plants left at the end of the test. This relationship shows that as the concentration of TS in the mixtures increases, the yield decreases. The order is as follows: RS > mixture 1 > mixture 2. In the mixtures with the addition of compost, the order of yield is: mixture 3 > mixture 4 > RS > mixture 5 and it is established that with the decrease of the content of reference soil in them the obtained mass also decreases. The highest reported value of the extracted alfalfa dry mass is in a mixture 3.

Based on the summarized data on the number of plants, their height and the obtained dry mass, it was found that the amount of added contaminated soil affects the emergence and growth of the alfalfa plants.

All the data presented up to now lead to the conclusion that alfalfa is more sensitive to the heavy metal contamination than oats, and the toxic effect, expressed through the observed effects of germination suppression, increased mortality of the plant specimens and slow growth in height, is more obvious.

Conclusions

The established data from the analysis for content of heavy metals in the test soil show that although available, their concentrations are below the established MAC values in the Republic of Bulgaria.

The results of the tests performed show, that the amount of added contaminated soil negatively affect the growth and development of the two types of higher plants oats (*A. sativa*) and alfalfa (*M. sativa*).

Through the observed effects of germination suppression, increased plant mortality and slow growth in height, it was found that oats (*A. sativa*) is more tolerant to heavy metal contamination than alfalfa (*M. sativa*), and the toxic effect in the second species is more obvious.

This study has been supported by Project BG05M2OP001-1.001-0008 – "Center of Excellence in Mechatronics and Clean Technologies", to Laboratory L2 "Bio-mechatronics and Micro/Nano Engineering for Mechatronic Technologies, Elements and Systems", Section S4 "Biomimetic Mechatronic System" and by Science and Research Programme (SRC) of the UCTM – Sofia (Contract No. 12080/2021).

References

1. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M., Friberg L.T. Chapter 1 Introduction – General considerations and international perspectives // Handbook on the toxicology of metals. 3th Edition / Eds. G.F. Nordberg, B.A. Fowler, M. Nordberg, L.T. Friberg. Academic Press is an imprint of Elsevier USA, 2007. P. 1–9. doi: 10.1016/B978-012369413-3/50056-2

2. Kocaman I., Konukcu F., Istanbullouglu A., Albut S. Effect of irrigation with Maritza and Ergene rivers water on soil contamination and heavy metal accumulation in rice crop // Bulg. J. Agric. Sci. 2015. V. 21. P. 71–77.

3. Lwin C., Seo B., Kim H., Owens G., Kim K. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality – a critical review // Soil Science and Plant Nutrition. 2018. V. 64. No. 2. P. 156–167. doi: 10.1080/00380768.2018.1440938

4. Khandaker M., Jusoh N., Ralmi N., Ismail S. The effect of different types of organic fertilizers on growth and yield of *Abelmoschus esculentus* L. Moench (okra) // Bulg. J. Agric. Sci. 2017. V. 23. No. 1. P. 119–125.

5. Mitova I., Dinev N. Effect of potassium fertilization on dynamic of fruit forming and yield of determinant cultivar and hybrids tomatoes // Soil Science Agrochemistry and Ecology. 2012. V. XLVI. No. 2. P. 43–48 (in Bulgarian).

6. Redon P., Beguiristain T., Leyval C. Influence of *Glomus intraradices* on Cd partitioning in a pot experiment with *Medicago truncatula* in four contaminated soils // Soil Biology & Biochemistry. 2008. V. 40. P. 2710–2712. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.07.018

7. Chirakkara R., Reddy K. Biomass and chemical amendments for enhanced phytoremediationof mixed contaminated soils // Ecological Engineering. 2015. V. 85. P. 265–274. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.029

8. Marinova S., Zlatareva E., Katidjotes N. Establishment the influence of compost mixtures on yield and chemical characteristics of plant production // Ecological Engineering and Environment Protection. 2017. V. 16. No. 3. P. 54–59 (in Bulgarian).

9. Mladenov M. Chemical composition of different types of compost // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2018. V. 53. No. 4. P. 712–716.

10. Ordinance No. 3 of August 1, 2008 on the permissible content of harmful substances in soils, issued by the Ministry of Environment and Water Resources, the Ministry of Health and the Ministry of Agriculture and Food // State Gazette of the Republic of Bulgaria. No. 71 from 12.08.2008 (in Bulgarian).

УДК 619:615.048+619:616-003 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-205-211

Изучение антитоксических и антиоксидантных свойств полисахаридов гриба *Hericium erinaceus* и диальдерона на модели оксидативного стресса, вызванного хлоркарбоном у белых мышей

© 2021. М. А. Азямов, к. в. н., в. н. с., А. А. Широких, д. б. н., в. н. с.,
Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,
e-mail: lazermikl@yandex.ru

Хлорсодержащие углеводороды с длительным периодом полураспада способны аккумулироваться во внешней среде, создавая угрозу для здоровья людей и животных. Особую опасность в этиологии системных поражений организма представляет хлоркарбон (тетрахлорметан), поскольку метаболизируется с образованием свободных радикалов, вызывающих в организме оксидативный стресс. В связи с актуальностью антиоксидантной терапии во многих странах широко используются биодобавки и лекарственные препараты на основе природных веществ. На модели оксидативного стресса, вызванного у белых мышей введением хлоркарбона (ХК), изучены антитоксические и антиоксидантные свойства полисахаридной фракции гриба *Hericium erinaceus* BP 16 (ПФНЕ) и диальдерона (декагидроксипролина-2-деценогидроизохинолина диметиламиноэтанола альбуминат).

В результате введения ХК в малых дозах в сыворотке крови белых мышей снижалось, по сравнению с интактными (здоровыми) животными 1-й контрольной группы, количество ферментов диаминоксидазы (ДАО), глутатионпероксидазы (ГТП), супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ), мелатонина (МТ), а количество аспарагинаминотрансферазы (АСТ), аланинаминотранферазы (АЛТ), содержание малонового диальдегида (МДА), напротив, повышалось. У животных в экспериментальных группах, в отличие от 2-й контрольной группы, на 5-е сут проведения курса инъекций ПФНЕ и диальдерона отмечали прекращение снижения ДАО, ГТП, СОД, КАТ, МТ. На 10-е сут под действием как ПФНЕ, так и диальдерона, показатели ДАО, ГТП, СОД, КАТ, МТ, АСТ, АЛТ, МДА соответствовали физиологической норме.

Впервые показано влияние препаратов на основе полисахаридов гриба *H. erinaceus* и диальдерона на процессы активации синтеза гормона мелатонина и фермента диаминоксидазы.

Ключевые слова: оксидативный стресс, тетрахлорметан, белые мыши, антиоксидантные ферменты, диаминоксидаза, мелатонин, диальдерон, грибные полисахариды *Hericium erinaceus*.

The study of the mushroom *Hericium erinaceus* polysaccharides and dialderon antitoxic and antioxidant properties on the oxidative stress model in mice caused by carbon tetrachloride

© 2021. M. A. Aziamov ORCID: 0000-0001-5718-9463,
A. A. Shirokikh ORCID: 0000-0002-7808-0376,
Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitskiy,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
e-mail: lazermikl@yandex.ru

The organochlorine compounds with long half-life period can accumulate in the environment threaten to human and animal health. Carbon tetrachloride poses a particular dander in the etiology of systemic lesions as it is metabolized with the formation of free radicals causing oxidative stress. The natural supplements and medicines become more and more vital because of antioxidant therapy in many countries. The mushrooms *Hericium erinaceus* BP 16 polysaccharides (PFHE) and dialderon (decahydroxyproline-2-decenohydroisohinoline dimethylaminoethanol albuminate) antitoxic and antioxidant properties were studied on the oxidative stress model in white mice caused by carbon tetrachloride (CT) – polytrophic toxin with long half life period in the environment.

The enzymes diamine oxidase (DAO), glutathione peroxides (GTP), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and hormone melatonin (MT) amounts in the serum of white mice were decreased in comparison with intact (healthy)

animals of 1-st control group, but the asparagine aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT) and malondialdehyde (MDA) were on the contrary increased after exposure to CT in the small doses. We were observing to stop of the decrease DAO, GTP, SOD, CAT, MT amounts on the fifth days after injections the PFHE and dialderon course in the experimental groups in comparison with 2-nd control group. The DAO, GTP, SOD, CAT, MT, AST, ALT, and MDA amounts were in accordance with physiological rates after ten days under the influence as PFHE and dialderon.

The effect of preparations based on the fungus *H. erinaceus* polysaccharides and dialderon on the activation of the MT and DAO synthesis has been shown for the first time.

Keywords: oxidative stress, carbon tetrachloride, white mice, antioxidant enzymes, diamine oxidase, melatonin, dialderon, mushrooms polysaccharides *Hericium erinaceus*.

Хлорорганические углеводороды относятся к приоритетным токсичным загрязнителям [1–3] и характеризуются высоким потенциальным риском для здоровья человека и животных [4]. Особую опасность в этиологии системных поражений организма представляет хлоркарбон (тетрахлорметан) [5]. Хлоркарбон (ХК) образуется при производстве пестицидов, металлов, нейлона, растворителей, сгорании нефтехимических продуктов [6]. Хлоркарбон устойчив к аэробной биодеградации (период полураспада исходных концентраций составляет от 195 до 245 лет). Как и другие хлорсодержащие углеводороды, ХК может переноситься на большие расстояния с потоками воздуха и аккумулироваться в почвах в токсичных концентрациях [7]. Выявленные очаги загрязнения ХК часто находятся в зонах производства сельскохозяйственного сырья и продуктов питания [8, 9].

В концентрации выше 0,2 мкг/кг массы тела ХК является высокотоксичным политропным ядом, который вызывает оксидативный стресс с повреждением печени и других органов, сердечно-сосудистой и дыхательной систем, вызывает метаболический и ферментативный дисбаланс и апоптоз клеток [10].

С целью нейтрализации действия токсических веществ и восстановления организма при оксидативном стрессе во многих странах широко используются биодобавки и лекарственные препараты на основе природных соединений. Так, сообщалось о наличии антитоксических и антиоксидантных свойств у полисахаридов, извлекаемых из плодовых тел и мицелия гриба *Hericium erinaceus* (Bull.: Fr.) Pers. [11–13], но механизм действия и конкретные количественные показатели процесса в этих работах не раскрыты. В лабораториях ветеринарной иммунологии и биотехнологии растений и микроорганизмов ФАНЦ Северо-Востока получены субстанции диальдерона (декагидроксипролина-2-деценогидроизохинолина диметиламиноэтанола альбуминат) и полисахаридов гриба *H. erinaceus,* обладающих терапевтической и противоонкологической активностью [14]. В связи с целесообразностью применения этих препаратов в ветеринарной и медицинской практике в качестве фармакологически активных веществ было продолжено изучение их биологического спектра действия.

Целью работы являлось изучение антитоксических и антиоксидантных свойств полисахаридной фракции гриба *H. erinaceus* ВР 16 (ПФНЕ) и композитного препарата диальдерон на модели оксидативного стресса.

Материалы и методы исследования

Антитоксические и антиоксидантные свойства ПФНЕ и диальдерона изучали на модели оксидативного стресса – процесса повреждения клеток в результате окисления у белых мышей при введении им малых доз ХК. Эксперименты выполняли в соответствии с международными рекомендациями Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях от 18 марта 1986 г.

Использовали белых беспородных мышей-самцов массой 20–21 г. Были сформированы 4 группы по 20 особей в каждой. Мышей первой группы не подвергали манипуляциям (интактные животные). Лабораторным животным остальных трёх групп (контрольной, первой и второй подопытным) внутрибрюшинно вводили ХК в дозе 0,05 мл/кг в виде 50%-го стерильного масляного раствора один раз в день в течение трёх сут. Затем мышам первой подопытной группы вводили раствор ПФНЕ, а животным второй подопытной группы – диальдерон в дозах 20 мг один раз в день в течение 10 сут.

Затем мышам первой подопытной группы вводили раствор ПФНЕ в дозе 20 мг один раз в день в течение 10 сут, а животным второй подопытной группы вводили диальдерон в дозе 20 мг один раз в день в течение 10 сут.

В течение эксперимента за состоянием мышей вели наблюдение. У всех животных (интактной, контрольной и подопытных групп)

на первые, пятые и десятые сут эксперимента брали кровь для определения в сыворотке количества антиоксидантных и антитоксических ферментов, гормона мелатонина.

Количество аспарагинаминотрансферазы (АСТ), аланинаминотранферазы (АЛТ), диаминоксидазы (ДАО), мелатонина (МТ), супероксиддисмутазы (СОД), глутатионпероксидазы (ГТП) и каталазы (КАТ) в сыворотке крови определяли на иммуноферментном анализаторе Zenyth 340 (Anthos), с помощью тест-наборов «Cloud-Clone Corp» (Китай) и «Cusabio Biotech Co» (Китай). Количество малонового диальдегида (МДА) в сыворотке крови белых мышей определяли согласно методу [15].

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы «STATISTICA» [16].

Результаты и обсуждение

Внутрибрюшинное введение ХК белым мышам контрольной группы, первой и второй подопытных групп приводило к развитию оксидативного стресса, характеризующегося увеличением МДА – продукта перекисного окисления липидов (ПОЛ) в организме животных (табл. 1). Внешне это проявлялось в угнетении, сменяющимся беспокойством и зудом, отказе от корма, повышенной жажде у животных. На первые сутки в сыворотке крови мышей всех групп, кроме интактной, повысилось в среднем в 4,7 раза количество фермента АСТ (табл. 2), по-видимому, в результате повреждения гепатоцитов и разрушения их цитозоля [17]. Значительное повышение уровня АСТ может указывать не только на гепатоцеллюлярное повреждение, но и на повреждение миоцитов сердца и β-клеточной популяции поджелудочной железы при отравлении ХК. В сыворотке крови мышей вышеуказанных групп отмечено также повышенное (в 1,9 раза по сравнению с интактной группой) количество АЛТ.

В сыворотке крови животных контрольной, первой и второй подопытных групп отмечали снижение содержания фермента ДАО с 68,4±1,24 до 48,8±2,45–52,2±0,86 пг/мл. Диаминоксидаза катализирует окислительное дезаминирование диаминов за счёт молекулярного кислорода с образованием аммиака и в последующем аминоальдегида. Снижение ДАО было обусловлено, очевидно, разрушением энтероцитов кишечника – основных продуцентов ДАО.

При интоксикации ХК в сыворотке крови мышей всех групп отмечали снижение уровня гормона мелатонина, в среднем в 1,7 раза по сравнению с интактной группой. При оксидативном стрессе уровень мелатонина снижается за счёт его превращений в реакциях со свободными радикалами.

На 5-е сут у мышей контрольной группы усилились симптомы отравления ХК: животные тяжело дышали, были угнетены, сидели неподвижно, много пили, иногда проявляли сильное беспокойство, отмечены зуд, расчёсы, слезотечение. В подопытных группах симптомы были сглажены, животные много пили, сильного зуда у мышей не наблюдали.

По сравнению с данными первого дня наблюдений, у мышей контрольной группы отметили дальнейшее увеличение в сыворотке крови количества ферментов печени АСТ и АЛТ, снижение ДАО и МТ, что подтверждает усиление токсического действия ПОЛ на организм (табл. 2). Вместе с тем, в сыворотке крови животных первой подопытной группы (ПФНЕ) наблюдали повышение количества антитоксического фермента ДАО и снижение АСТ, по сравнению с первыми сут эксперимента. Это указывает на гепатопротективный и детоксицирующий эффект ПФНЕ, проявившийся в снижении апоптоза гепатоцитов и энтероцитов. В сыворотке крови мышей второй опытной группы (диальдерон) наблюдали повышение МТ, способного стимулировать активность глутаминпероксидазы и каталазы, а также непосредственно нейтрализовывать свободные радикалы и удалять из клеток перекись водорода.

На 10-е сут наблюдали ухудшение состояния мышей контрольной группы, без изменения симптомов. В сыворотке крови увеличились количество АСТ и АЛТ, снизилось содержание ДАО и МТ.

В подопытных группах животные вели себя активно, не проявляя беспокойства. В сыворотке крови отмечали достоверное снижение АЛТ и АСТ, повышение ДАО и МТ по сравнению с показателями мышей контрольной группы (табл. 2). Полученные показатели сыворотки крови животных первой подопытной группы подтверждали антитоксические и гепатопротективные, а также антигистаминные свойства ПФНЕ, на что указывает повышение уровня ДАО, вызывающей снижение уровня гистамина.

В сыворотке крови мышей второй подопытной группы, под действием диальдерона, тоже достоверно увеличилось количе-

Таблица 1 / Table 1

Антиоксидантные свойства ПФНЕ и диальдерона на модели оксидативного стресса у белых мышей
Antioxidant properties of the PFHE and dialderon on the oxidative stress model in white mice

Показатели Markers	Интактная группа Intact group *n* = 20	Контрольная группа Control group (ХК), *n* = 20 (CT), *n* = 20	Подопытные группы Experimental groups	
			1-я группа (ПФНЕ), *n* = 20 1st group (PFHE), *n* = 20	2-я группа (диальдерон), *n* = 20 2nd group (dialderon), *n* = 20
На первые сутки / On the first day				
МДА ммоль/л / MDA mmol/L	0,24±0,01	0,59±0,02*	0,42±0,01*	0,56±0,05*
СОД нг/мл / SOD ng/mL	2,81±0,07	0,86±0,05*	0,85±0,04*	0,78±0,06*
ГТП нг/мл / GP1 ng/mL	2,5±0,05	1,2±0,02*	1,4±0,06*	1,3±0,04*
КАТ пг/мл / CAT pg/mL	28,2±0,31	16,8±0,45*	17,9±0,62*	16,5±0,54*
На пятые сутки / On the fifth day				
МДА ммоль/л / MDA mmol/L	0,21±0,02	0,98±0,05	0,76±0,02**	0,81±0,02**
СОД нг/мл / SOD ng/mL	2,65±0,04	0,74±0,08	0,88±0,05**	0,84±0,04**
ГТП нг/мл / GP1 ng/mL	2,7±0,06	0,8±0,02	1,8±0,09**	1,6±0,08**
КАТ пг/мл / CAT pg/mL	27,6±0,24	14,5±0,44	19,9±0,71**	18,4±0,26**
На десятые сутки / On the tenth day				
МДА ммоль/л / MDA mmol/L	0,22±0,03	1,28±0,04	0,24±0,02**	0,50±0,01**
СОД нг/мл / SOD ng/mL	2,82±0,05	0,55±0,06	2,69±0,08**	2,74±0,04**
ГТП нг/мл / GP1 ng/mL	2,6±0,07	0,7±0,03	2,5±0,04**	2,4±0,05**
КАТ пг/мл / CAT pg/mL	25,9±0,32	12,8±0,65	24,9±0,54**	26,2±0,18**

*Примечание: * – достоверно при p < 0,05, по сравнению с показателями 1-й контрольной группы; ** – достоверно при p < 0,01, по сравнению с показателями 2-й контрольной группы.*

*Note: * – reliably with p < 0.05 in comparison with the data of the 1st control group; ** – reliably with p < 0.01 in comparison with the data of the 2nd control group.*

Таблица 2 / Table 2

Антитоксические свойства ПФНЕ и диальдерона на модели оксидативного стресса у белых мышей
Antitoxic properties of the PFHE and dialderon on the oxidative stress model in white mice

Показатели Markers	Интактная группа Intact group *n* = 20	Контрольная группа Control group (ХК), *n* = 20 (CT), *n* = 20	Подопытные группы Experimental groups	
			1-я группа (ПФНЕ), *n* = 20 1st group (PFHE), *n* = 20	2-я группа (диальдерон), *n* = 20 2nd group (dialderon), *n* = 20
На первые сутки / On the first day				
АСТ пг/мл / AST pg/mL	25,14±0,98	118,11±1,16*	116,44±2,14*	121,16±2,55*
АЛТ нг/мл / ALT ng/mL	1,6±0,25	3,1±0,12*	3,2±0,44*	2,9±0,18*
ДАО пг/мл / DAO pg/mL	68,4±1,24	52,2±0,86*	51,7±3,12*	48,8±2,45*
МТ пг/мл / MT pg/mL	28,45±1,16	16,85±2,05*	16,94±2,24*	15,85±1,48*
На пятые сутки / On the fifth day				
АСТ пг/мл / AST pg/mL	24,82±2,16	165,25±4,48	80,14±3,16**	78,92±1,46**
АЛТ нг/мл / ALT ng/mL	1,5±0,58	4,2±0,24	3,5±0,38**	3,4±0,82**
ДАО пг/мл / DAO pg/mL	67,8±2,15	42,6±3,12	54,5±0,94**	46,6±1,25**
МТ пг/мл / MT pg/mL	29,25±2,35	14,11±0,96	15,28±1,45**	18,97±1,14**
На десятые сутки / On the tenth day				
АСТ пг/мл / AST pg/mL	24,25±1,75	342,8±4,32	28,12±3,25**	30,14±2,08**
АЛТ нг/мл / ALT ng/mL	1,6±0,34	5,8±0,16	1,7±0,14**	1,8±0,22**
ДАО пг/мл / DAO pg/mL	68,1±1,22	32,2±2,11	63,6±1,48**	60,8±1,65**
МТ пг/мл / MT pg/mL	28,76±1,24	12,48±1,35	19,87±1,08**	21,44±1,12**

*Примечание: * – достоверно при p < 0,05, по сравнению с показателями 1-й контрольной группы; ** – достоверно при p < 0,01, по сравнению с показателями 2-й контрольной группы.*

*Note: * – reliably with p < 0,05 in comparison the date of the 1st control group; ** – reliably with p < 0,01 in comparison the date of the 2nd control group.*

ство ДАО и, особенно, МТ (с 15,85±1,48 до 21,44±1,12 пг/мл, $p < 0,05$), усиливающего компенсаторную реакцию детоксикации организма в условиях окислительного стресса. Мелатонин и его продукты распада уменьшают повреждение ДНК и липидов клеточных мембран, что снимает повреждающее действие ПОЛ [18–21].

Активация ПОЛ приводит к окислению мембранных белков и изменению ферментативной активности. Так, на 1-е сут в крови животных всех групп, кроме интактной, отмечали понижение количества СОД, КАТ и ГТП (табл. 2). Особенно значительно (в 3,3 раза по сравнению с интактной группой) понизилось содержание СОД. При снижении активности исследуемых антиоксидантных ферментов, уровень МДА увеличился в 2,5 раза. Известно, что МДА ускоряет патологические процессы и повреждает в клетках ДНК [22, 23]. Хотя на 5-е сут количество МДА в сыворотке крови мышей подопытных групп, как и в контроле, оставалось высоким и свидетельствовало о функциональной напряжённости антиоксидантной системы, тем не менее уровень СОД, ГТП и КАТ в сыворотке крови животных подопытных групп возрос по сравнению с показателями, отмеченными на 1-е сут, что указывало на проявление антиоксидантных свойств ПФНЕ и диальдерона (табл. 1).

На 10-е сут низкие показатели антиоксидантных ферментов и повышенное содержание МДА в сыворотке крови животных контрольной группы указывало на истощение антиоксидантной системы организма под действием ХК. У животных обеих подопытных групп показатели СОД, ГТП, КАТ и МДА в сыворотке крови нормализовались полностью, что указывает на антитоксическое и антиоксидантное действие препаратов на основе полисахаридов гриба *H. erinaceus* и диальдерона.

Заключение

В исследовании установлено, что препарат на основе полисахаридной фракции искусственно выращенных плодовых тел гриба *H. erinaceus* BP 16 и противоопухолевый композитный препарат диальдерон могут оказывать влияние на антиоксидантный статус организма белых мышей в условиях стресса, индуцированного введением политропного токсиканта – хлоркарбона.

Увеличение в сыворотке крови подопытных животных количества антиоксидантных ферментов, ДАО, МТ на 5-е сут и нормализация АСТ, АЛТ, СОД, ГТП, КАТ, ДАО и МТ в сыворотке на 10-е сут после курса ПФНЕ и диальдерона (20 мг/сут) указывает на наличие антитоксических и антиоксидантных свойств этих субстанций при оксидативном стрессе организма. Увеличение количества ДАО под действием ПФНЕ и её опосредованное действие на синтез МТ и ГТП является одним из основных элементов антиоксидантного, гепатопротективного и репаративного эффектов полисахарида *H. erinaceus* BP 16. Стабилизация процессов пероксидации в организме мышей под действием диальдерона подтверждена увеличением синтеза МТ, способного стимулировать активность ГТП и КАТ. Впервые показано влияние препаратов на основе полисахаридов гриба *H. erinaceus* и диальдерона на процессы активации синтеза гормона мелатонина и фермента диаминоксидазы.

Уменьшение в сыворотке крови количества ДАО, СОД, ГТП, КАТ и МТ можно рассматривать как индикаторные параметры, тестирующие метаболические нарушения организма под воздействием химического загрязнения окружающей среды хлорорганическими соединениями, в частности ХК.

References

1. Rhew R.C., Miller B.R., Weiss R.F. Chloroform, carbon tetrachloride and methyl chloroform fluxes in Southern California ecosystems // Atmospheric Environment. 2008. V. 42. No. 30. P. 7135–7140. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.05.038

2. Cao H., Chao S., Qiao L., Jiang Y., Zeng X., Fan X. Urbanization-related changes in soil PAHs and potential health risks of emission sources in a township in Southern Jiangsu, China // Science of the Total Environment. 2017. V. 575. P. 692–700. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.106

3. Robertus Yu.V., Kulikova-Khlebnikova E.N. On the problem of detoxification of soils contaminated with organochlorine pesticides // Prirodnye resursy Gornogo Altaya. 2009. No. 1. P. 91–93 (in Russian).

4. Konstantinova E.Yu., Sushkova S.N., Minkina T.M., Antonenko E.M., Konstantinov A.O., Horoshavin V.Yu. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of industrial and residential areas of Tyumen // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. V. 329. No. 8. P. 66–79 (in Russian).

5. Walker S.J., Weiss R.F., Salameh P.K. Reconstructed histories of the annual mean atmospheric molecular fractions for the halocarbons CFC-11, CFC-12, CFC-113, and carbon tetrachloride // Journal of Geophysical Research. 2000. V. 105. No. C6. P. 14285–14296. doi: 10.1029/1999JC900273

6. Rhew R.C., Happell J.D. The atmospheric partial lifetime of carbon tetrachloride with respect to the global soil sink // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. No. 6. P. 2889–2895. doi: 10.1002/2016GL067839

7. Happell J.D., Mendoza Y., Goodwin K.D. A reassessment of the soil sink for atmospheric carbon tetrachloride based upon static flux chamber measurements // Journal of Atmospheric Chemistry. 2014. V. 71. No. 2. P. 113–123. doi: 10.1007/s10874-014-9285-x

8. Mendoza Y., Goodwin K.D., Happell J.D. Microbial removal of atmospheric carbon tetrachloride in bulk aerobic soils // Applied and Environmental Microbiology. 2011. V. 77. No. 17. P. 5835–5841. doi: 10.1128/AEM.05341-11

9. Liu X.F. Evidence of biodegradation of atmospheric carbon tetrachloride in soils: Field and microcosm studies. Ph.D. thesis. New York: Columbia University, 2006. 139 p.

10. Kolesnikova L.I., Darenskaya M.A., Kolesnikov S.I. Free radical oxidation: a pathophysiologist's view // Bulletin of Siberian Medicine. 2017. V. 16. No. 4. P. 16–29 (in Russian). doi: 10.20538/1682-0363-2017-4-16-29

11. Vasser C.P. The science of medicinal mushrooms: modern perspectives, achievements, evidence, and challenges // Biosfera. 2015. V. 7. No. 2. P. 238–248 (in Ukraine).

12. De Silva D.D., Rapior S., Sudarman E., Stadler M., Xu J., Alias S.A., Hyde K.D. Bioactive metabolites from macrofungi: ethnopharmacology, biological activities and chemistry // Fungal Diversity. 2013. V. 62. No. 1. P. 1–40. doi: 10.1007/s13225-013-0265-2

13. He X., Wang X., Fang J., Chang Y., Ning N., Guo H., Zhao Z. Structures, biological activities, and industrial applications of the polysaccharides from *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom: A review // International Journal of Biological Macromolecules. 2017. V. 97. P. 228–237. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.040

14. Azyamov M.A., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya. The toxicity comparison of antitumor substances: the mushroom *Hericium erinaceus* BP 16 polysaccharides, dialderon and methotrexate // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 142–149 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-142-149

15. Arutyunyan A.V., Dubinina E.E., Zybina N.N. Methods for evaluating free radical oxidation and the body's antioxidant system. Sankt-Peterburg: IKF "Foliant", 2000. 104 p. (in Russian).

16. Rebrova O.Yu. Statistical analysis of medical data. Application software package STATISTICA. Moskva: MediaSfera, 2002. 312 p. (in Russian).

17. Gabitova D.M., Ryzhikova V.O., Ryzhikova M.A. Antioxidative protective system of organizm // Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal. 2006. V. 13. No. 2. P. 94–96 (in Russian).

18. Hardeland R. Antioxidative protection by melatonin // Endocrine. 2005. V. 27. No. 2. P. 119–130. doi: 10.1385/ENDO:27:2:119

19. Tan D.-X., Manchester L.C., Terron M.P., Flores L.F., Reiter R.J. One molecule, many derivatives: a never-ending interaction of melatonin with reactive oxygen and nitrogen species? // Journal of Pineal Research. 2007. V. 42. P. 28–42. doi: 10.1111/j.1600-079X.2006.00407.x

20. Yoshida M., Fukuda A., Hara M., Terada A., Kitanaka Y., Owada S. Melatonin prevents the increase in hydroxyl radical-spin trap adduct formation caused by the addition of cisplatin in vitro // Life Sciences. 2003. V. 72. No. 15. P. 1773–1780. doi: 10.1016/s0024-3205(02)02480-3

21. Sakano K., Oikawa S., Hiraku Y., Kawanishi S. Oxidative DNA damage induced by a melatonin metabolite, 6-hydroxymelatonin, via a unique non-o-quinone type of redox cycle // Biochem Pharmacol. 2004. V. 68. No. 9. P. 1869–1878. doi: 10.1016/j.bcp.2004.06.016

22. Titov V.N., Krylin V.V., Dmitriev V.A., Yashin Ya.I. Plasma antioxidant activity is a test for impaired biological functions of endoecology, exotrophy, and inflammation reactions // Klinicheskaya laboratornaya diagnostika. 2010. No. 7. P. 3–14 (in Russian).

23. Savlukov A.I., Kamilov R.F., Samsonov V.M., Shakirov D.F. Estimation of a free radical oxidation-antioxidant defense system upon exposure to chemical industrial factors // Klinicheskaya laboratornaya diagnostika. 2010. No. 6. P. 22–27 (in Russian).

УДК 547.458+612.112 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-212-218

Hericium erinaceus BP16 как источник полисахаридов, стабилизирующих функции сперматозоидов быков при гипотермическом хранении

© 2021. О. Н. Соломина[1], к. б. н., н. с., М. И. Сергушкина[1], м. н. с., А. А. Широких[2], д. б. н., в. н. с., Т. В. Полежаева[1], д. б. н., зав. лабораторией, И. Г. Широких[2], д. б. н., зав. лабораторией, О. О. Зайцева[1], к. б. н., с. н. с., А. Н. Худяков[1], к. б. н., с. н. с.,
[1]Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 50,
[2]Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого, 610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,
e-mail: ddic@yandex.ru, irgenal@mail.ru

Актуальность сохранения генетических ресурсов животного и растительного мира обусловливает необходимость поиска биологически активных веществ для консервации репродуктивных клеток. В условиях гипотермического хранения осмотичность внеклеточной среды, стабилизацию мембран и структуру цитоскелета клеток могут обеспечивать различные сахара. Ксилотрофный базидиальный гриб *Hericium erinaceus* (Bull.: Fr.) Pers. представляет собой источник полисахаридов с высокой биологической активностью. В составе углеводных цепей полисахаридной фракции (ПФ) *H. erinaceus* BP16 идентифицированы остатки галактозы, глюкозы, арабинозы, маннозы, фукозы, рамнозы, ксилозы (в порядке снижения % содержания). Изучено влияние ПФ разных концентраций на процессы замерзания воды в водном растворе глицерина, а также на показатели жизнеспособности сперматозоидов быков голштинской породы в условиях гипотермического (+4 °С) хранения: на интенсивность процессов перекисного окисления липидов и антиоксидантную активность, на способность гамет к прогрессивному движению, на устойчивость сперматозоидов к гипоосмотическому стрессу. В связи с поиском новых эффективных компонентов для консервирующих растворов полученные в работе данные свидетельствуют о перспективе применения ПФ *H. erinaceus* в качестве компонента для замедления скорости кристаллизации льда в клеточных суспензиях при их замораживании и антиоксидантного регулятора функциональной полноценности гамет при охлаждении.

Ключевые слова: *Hericium erinaceus*, полисахариды, сперматозоиды, охлаждение, гипотермическое хранение.

Hericium erinaceus BP16 as a source of polysaccharides stabilizing the functions of bulls spermatozoa during hypothermic storage

© 2021. O. N. Solomina[1] ORCID: 0000-0001-5187-8698, M. I. Sergushkina[1] ORCID: 0000-0002-3113-527X, A. A. Shirokikh[2] ORCID: 0000-0002-7808-0376, T. V. Polezhaeva[1] ORCID: 0000-0003-4999-3077, I. G. Shirokikh[2] ORCID: 0000-0002-3319-2729, O. O. Zaitseva[1] ORCID: 0000-0001-9427-0420, A. N. Khudyakov[1] ORCID: 0000-0003-3757-8263,
[1]Institute of Physiology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 50, Pervomayskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
[2]Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
e-mail: ddic@yandex.ru, irgenal@mail.ru

The relevance of preserving the genetic resources of the animal and plant world necessitates the search for biologically active substances for the preservation of reproductive cells. Under conditions of hypothermic storage, the osmosis of the extracellular environment, stabilization of membranes and the structure of the cytoskeleton of cells can be provided by

various sugars. Xylotrophic basidiomycete *Hericium erinaceus* (Bull.: Fr.) Pers. is a source of polysaccharides with high biological activity. Residues of galactose, glucose, arabinose, mannose, fucose, rhamnose, xylose (in order of decreasing % content) were identified in the carbohydrate chains of the polysaccharide fraction (PF) of *H. erinaceus* BP16. The effect of PF of different concentrations on the freezing of water in an aqueous solution of glycerin, as well as on the viability of spermatozoa of Holstein bulls under hypothermic (+ 4 °C) storage conditions, on the intensity of lipid peroxidation processes and antioxidant activity, on the ability of gametes for progressive movement, on sperm resistance to hypoosmotic stress. In connection with the search for new effective components for preserving solutions, the data obtained in this work indicate the prospect of using the PF of *H. erinaceus* as a component to slow down the rate of ice crystallization in cell suspensions during freezing and as an antioxidant regulator of the functional usefulness of gametes during cooling.

Keywords: *Hericium erinaceus,* polysaccharides, spermatozoa, refrigeration, hypo-thermal storage.

В связи с поиском новых природных источников биологически активных веществ актуально изучение химического состава и физиологических функций полисахаридов и гликопротеинов базидиальных грибов. Ежовик гребенчатый (*Hericium erinaceus* (Bull.: Fr.) Pers.) – представитель агарикоидных ксилотрофных грибов (порядок Russulaceae) – издавна известен как ценный съедобный и лекарственный вид в странах Европы и Южной Америки, искусственно культивируется и используется в традиционной медицине стран Восточной Азии. Исследования последних 10–15 лет привели к изоляции из плодовых тел и мицелия этого гриба, в общей сложности, более 35 полисахаридов, которые являются своего рода биоактивными компонентами и отвечают за противораковую, иммуномодулирующую, гиполипидемическую, антиоксидантную и нейропротекторную активность этого гриба [1, 2]. Известно большое количество медицинских продуктов и лекарств, запатентованных в Китае [3], США, Японии и Корее [4], которые содержат в качестве действующего вещества, только *H. erinaceus*. В настоящее время активно продолжаются исследования, направленные на расширение границ практического использования полисахаридов *H. erinaceus*.

Анализ литературных [5, 6] и собственных [7, 8] данных позволяет предположить, что полисахаридные фракции *H. erinaceus* могут оказать положительный эффект при гипотермическом или низкотемпературном хранении репродуктивных клеток. Сахара в анаэробных и аэробных условиях являются для клетки не только энергетическим субстратом, но и обеспечивают необходимую осмотичность во внеклеточной среде, стабилизируют белковолипидные комплексы мембран клеток и структуру цитоскелета при охлаждении, что обусловливает их криозащитный эффект [9, 10].

Целью настоящего исследования являлась оценка способности полисахаридов гриба *H. erinaceus* BP16 оказывать влияние на сохранность функций сперматозоидов быка в условиях гипотермического хранения.

Объекты и методы исследования

Для выделения полисахаридов использовали плодовые тела гриба *H. erinaceus* (природный изолят BP16, нуклеотидная последовательность фрагмента ITS1_5.8S_ITS2 депонирована в NCBI под номером MK809367), выращенного в стеклянных ёмкостях (500 мл) на лигноцеллюлозном композитном субстрате, состоящем из дубовых опилок, зерна овса и соломы (1 : 3 : 6 об.%). В субстрат после автоклавирования (1 атм в течение 25 мин) и охлаждения заполненных на три четверти объёма ёмкостей асептически вносили агаровые блоки с мицелием, вырезанные из 15-ти суточной газонной культуры гриба на сусло-агаре (4° по Баллингу). Ёмкости с инокулированным субстратом инкубировали при комнатной температуре (20±1 °С). По мере формирования грибом плодовых тел, начиная с четвёртой недели культивирования, каждые 10–15 дней их срезали и высушивали при 60 °С.

Сухие плодовые тела *H. erinaceus* (50 г) заливали горячей (70 °С) дистиллированной водой и оставляли на 8 ч для экстракции. Водный экстракт плодовых тел смешивали с 3 объёмами 96%-ного этанола и оставляли на ночь при 4 °С для осаждения полисахаридсодержащей фракции (ПФ). Полученный таким образом осадок отделяли декантацией, упаривали при 60 °С и измельчали до получения крупного порошка экстрагированных горячей водой полисахаридов (1,38 г).

Сахара, входящие в состав полисахаридов, определяли методом газожидкостной хроматографии (ГЖХ) в виде соответствующих ацетатов полиолов на хроматографе «Varian 450-GC» (США) с пламенно-ионизационным детектором, как описано ранее [8]. Процентное содержание моносахаридов от суммарного препарата вычисляли из площадей пиков, используя коэффициенты отклика детектора [11].

Для характеристики криоосмотических свойств полисахаридов на дистиллированной воде готовили растворы ПФ в концентрациях 1,0; 0,7–0,1% (вес/объём). Кроме ПФ гриба в работе использовали водный раствор (вес/объём) криопротектора эндоцеллюлярного (проникающего) действия – глицерина 3,5% (ЗАО; ЭКОлаб, г. Электрогорск). Осмолярные концентрации и температуры замерзания водных растворов веществ определяли с помощью осмометракриоскопа ОСКР-1 (НПП «Буревестник», Санкт-Петербург). Абсолютная погрешность при определении осмолярной концентрации вещества в диапазоне измерений от 0 до 500 мОсм/л составляла ±2,0; температура замерзания в диапазоне от -0,930 до -3,720 °С – ±0,010. Исследуемый раствор, объёмом 0,3 мл, помещали в пластиковую кювету, погружали в неё измерительный элемент и устанавливали в термостатируемую камеру прибора.

Сперматозоиды быков-производителей голштинской породы получали в производственных условиях ОАО «КировПлем». Свежеполученную сперму от 15 быков с подвижностью 7–9 баллов разбавляли 1 : 1 лактозо-цитратно-желточной средой для спермы быков. Через 5 мин в полученную смесь медленно, по каплям добавляли в соотношении 2 : 3 лактозо-цитратно-желточную среду с глицерином (контрольная группа) или лактозо-цитратно-желточную среду с глицерином и ПФ *H. erinaceus* в исследуемых концентрациях (опытные группы). Конечная концентрация глицерина в среде сперматозоидов составляла 4,4%, ПФ – 0,12; 0,36 и 0,60%. Смесь разливали по полимерным коническим микропробиркам по 0,5 мл, которые выдерживали при +6 °С от 1 до 9 сут. До и после гипотермической экспозиции определяли показатели жизнеспособности сперматозоидов.

Количество гамет определяли путём микроскопирования в камере Горяева (с добавлением 3% хлорида натрия для обездвиживания сперматозоидов) по общепринятой методике и выражали в млрд/мл. Уровень биологической полноценности сперматозоидов определяли по показателю их подвижности в 3% цитрате натрия в камере Горяева (10 баллов – все сперматозоиды в поле зрения двигаются поступательно вперёд).

Жизнеспособность сперматозоидов оценивали с помощью теста на гипоосмотическое набухание (HOS-тест). В 400 мл 1% раствора цитрата натрия, подкрашенного эозином, добавляли 0,02 мл разжиженного эякулята. Выдерживали смесь при +20 °С не менее 30 мин и исследовали сперматозоиды в фазово-контрастном микроскопе. Набухание сперматозоидов идентифицировали по скручиванию и вздутию их хвостов. Подсчитывали число набухших клеток на 100 исследуемых сперматозоидов, выражали в процентах. Высокий процент набухших спермиев указывает на наличие клеток, имеющих функциональную и неповреждённую плазматическую мембрану.

Интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали хемилюминесцентным методом на биохемилюминометре БХЛ-07 (ООО «Медозонс», Россия). В измерительную кювету прибора вносили 0,1 мл спермы в растворе глицерина и одной из концентраций ПФ и 0,4 мл фосфатного буфера (pH 7,5 ед.), добавляли 0,4 мл 0,01 мМ раствора сульфата железа (ОАО «Спектр-Хим» г. Москва) и помещали в измерительную кювету. После чего в неё быстро вносили 0,2 мл 2% раствора перекиси водорода (ЗАО «СП Химпром» г. Самара) и регистрировали сигнал в течение 30 с. Оценивали следующие параметры: I_{max} (мВ) – максимальную интенсивность быстрой вспышки, отражающей потенциальную способность биологического объекта к свободно радикальному окислению; S (мВ • с) – светосумму за 30 с, отражающую содержание радикалов $\cdot RO_2$; tg(-2α) – тангенс угла наклона кривой оси времени (характеризует максимальную крутизну спада кривой, со знаком «-»), чем выше значение показателя tg(-2α), тем выше активность ферментативных систем клеток, регулирующих содержание гидроперекисей.

Результаты исследования подвергали статистическому анализу с использованием программы «BioStat 2009 Professional 5.8.4» (AnalystSoft, США). Для оценки различий использовали непараметрические критерии Манна-Уитни и Уилкоксона, считая различия значимыми при $p < 0,05$. Результаты исследования на рисунках представлены в виде $M \pm \sigma$, в таблице – в виде медианы, 25-го и 75-го центилей (*Me*, *Q1–Q3*).

Результаты и обсуждение

Грибные полисахариды по своей природе являются водорастворимыми глюканами с сильно разветвлённой структурой, в состав которых, наряду с глюкозой, могут входить другие моно-, полисахаридные и протеиновые комплексы (протеоглюканы) [12]. Вариативность молекулярной массы и моносахаридного

состава сопровождаются различиями в биологической активности полисахаридов [13]. Структура полисахаридов, синтезируемых грибом *H. erinaceus*, может значительно изменяться в зависимости от штамма и условий его роста [14].

Из плодовых тел искусственно культивируемого гриба *H. erinaceus* BP16, в результате экстракции горячей водой и последующего осаждения этанолом, была получена ПФ с выходом 2,8% массы сухого материала. По данным ГЖХ углеводные цепи ПФ штамма BP16 состоят преимущественно из остатков галактозы (9,62%), глюкозы (9,14%) и арабинозы (6,79%). В меньших количествах идентифицированы в составе углеводных цепей остатки маннозы (5,01%), рамнозы (2,35%) и фукозы (2,68%). В качестве минорного компонента отмечена ксилоза (0,30%). Из литературы известно, что биологическая активность полисахаридов часто бывает обусловлена наличием в их составе остатков таких моносахаридов, как манноза, арабиноза и галактоза [15, 16]. Выявление этих структурных компонентов в составе углеводных цепей гериция послужило предпосылкой к проведению оценки эффективности ПФ *H. erinaceus* в качестве природного криопротектирующего средства.

С помощью криоскопического метода изучена способность ПФ *H. erinaceus* изменять температуру замерзания 3,5% водного раствора глицерина. Установлено, что полисахариды в концентрациях 0,3; 0,7 и 1,0% повышают осмолярность раствора глицерина соответственно на 97, 82 и 100 мОсм/л, что способствует понижению температуры его замерзания на 0,19; 0,16 и 0,19 °С (рис. 1).

С помощью хемилюминесцентного метода установлено, что наличие в среде сперматозоидов полисахаридной фракции *H. erinaceus* в концентрации 0,36% способствует стабилизации процессов ПОЛ в их мембранах (по значению показателей I_{max}, S). Статистически значимо данный эффект проявляется на сроке хранения 9 сут. Вероятно, это обусловлено тем, что данная концентрация полисахаридов способствует повышению активности ферментативных систем клеток, регулирующих содержание гидроперекисей. На это указывает значимое повышение показателя tg(-2α) (рис. 2).

Следовательно, ПФ *H. erinaceus* можно использовать в составе консервирующих сред в качестве компонента для замедления скорости кристаллизации льда в клеточных суспензиях при их замораживании в случае необходимости.

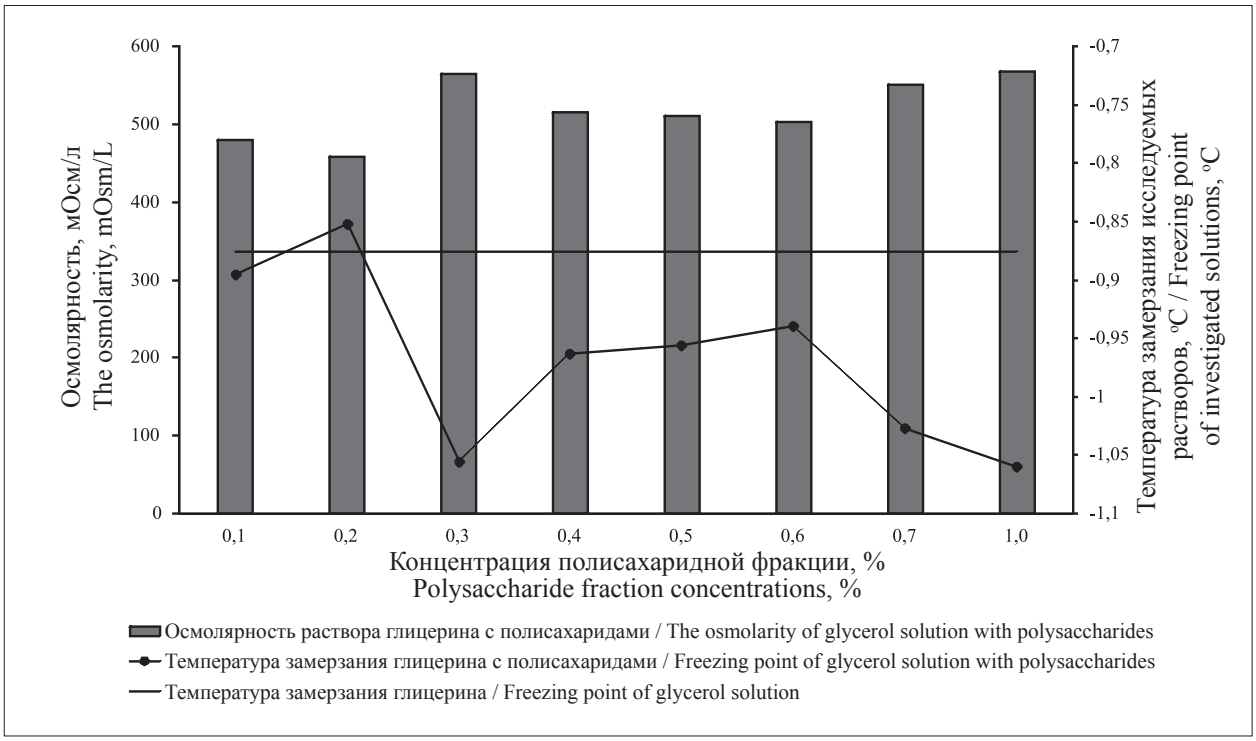


Рис. 1. Изменение температуры замерзания 3,5% раствора глицерина при наличии в среде полисахаридной фракции *H. erinaceus*
Fig. 1. The change of the freezing point of 3.5% glycerol solution in the presence of a polysaccharide fraction from *H. erinaceus*

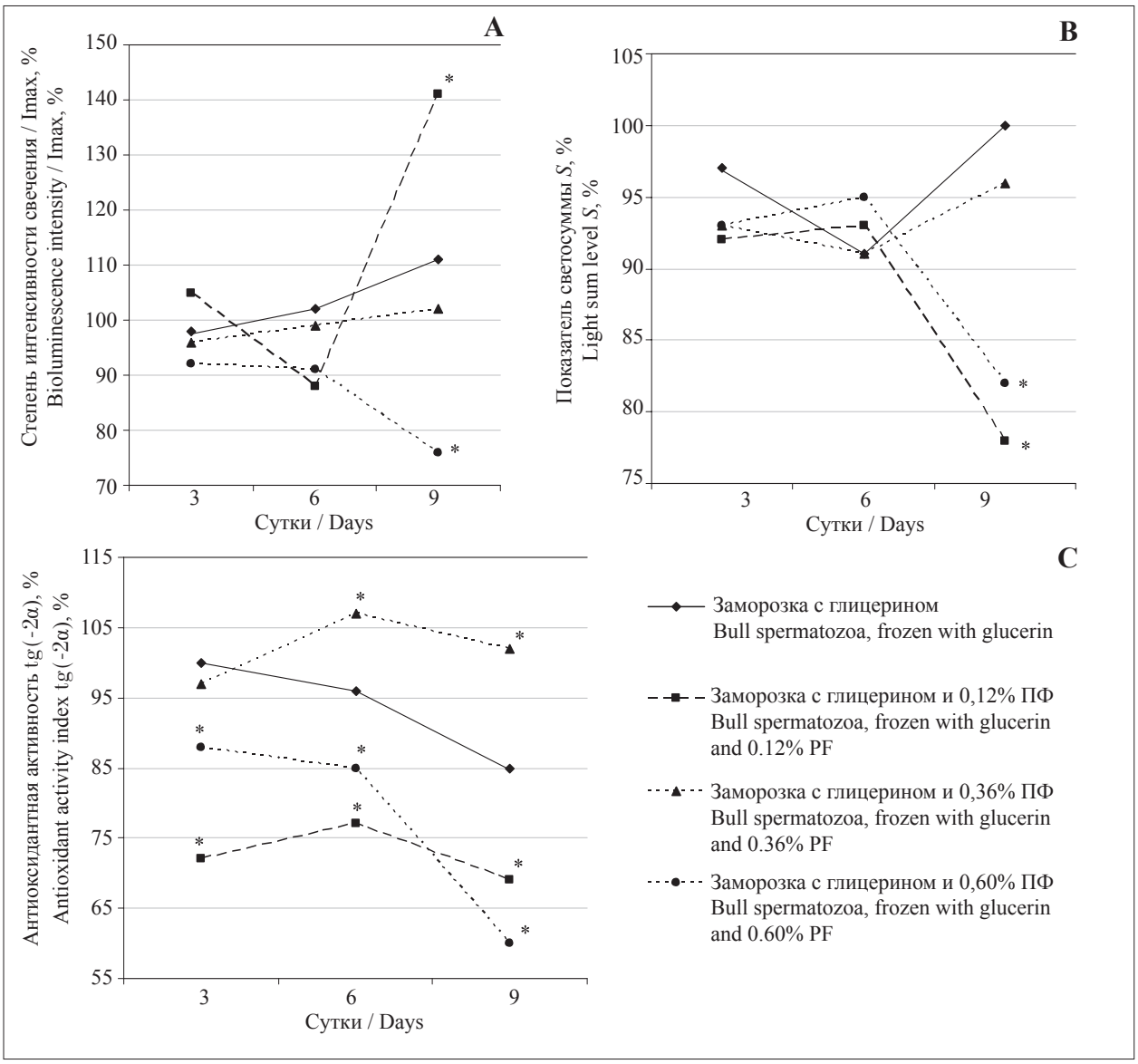


Рис. 2. Показатели (I_{max}, S) интенсивности перекисного окисления липидов (диаграммы A, B) и антиоксидантной активности (tg(-2α)) сперматозоидов быка (диаграмма C), подвергнутых гипотермическому (+6 °C) хранению в течение 3, 6 и 9 сут в среде глицерина (4,4%) и полисахаридной фракции (ПФ) *H. erinaceus* в разных концентрациях. Данные представлены в виде среднего арифметического значения ± стандартное отклонение ($M \pm \delta$, n = 37)

Fig. 2. Indicators (I_{max}, S) of the intensity of lipid peroxidation (graphics A, B) and antioxidant activity (tg(-2α)) of bovine spermatozoa (graphic C) after cooling to +6 °C and storage (in this temperature) for 3, 6 and 9 days in glycerol medium (4,4%) and polysaccharide fraction (PF) from *H. erinaceus* in different concentrations. Data are presented an arithmetic mean value ± standard deviation ($M \pm \delta$, n = 37)

У гамет, хранившихся в среде одного глицерина при +6 °C способность спермиев к прогрессивному движению на уровне 40% (допустимой для оплодотворения) сохранялась в течении 6 сут, при введении в глицериновую среду ПФ 0,36% – 7 сут (табл. 1). Вероятно, данный эффект обусловлен выявленным и описанным выше антиоксидантным действием ПФ в указанной концентрации.

Жизнеспособность сперматозоидов, согласно HOS-тесту, во все сроки хранения соответствовала уровню спермиев в глицерине, т. е. наличие в среде ПФ не повлияло на эффект глицерина по данному показателю (табл. 2, рис. 3). Мы полагаем, что в условиях гипотермического хранения спермиев при +6 °C в течении 9 сут мембрана не получала существенных повреждений, поэтому при гипоосмотическом стрессе приток жидкости в клетку не вызывал её неконтролируемого разбухания до степени разрыва мембраны.

Таблица 1 / Table 1

Показатель подвижности сперматозоидов (*Me*, *Q1–Q3*), подвергнутых гипотермическому (+6 °С) хранению в течение 3–9 сут в среде глицерина (4,4%) и ПФ *H. erinaceus* в различных концентрациях
Sperm motility index (*Me*, *Q1–Q3*) after hypothermic storage (+6 °C) for 3–9 days in the presence of glycerol (4,4%) and different concentrations PF from *H. erinaceus*

Серия Series	Сроки хранения (сут) / Storage periods (days)				
	3	6	7	8	9
Глицерин Glycerol	78 (62,5–83,5)	44 (25–67)	22 (15,25–53)	11 (0–29,75)	12 (0–44)
+ 0,12 % ПФ + 0,12% PF	87 (75–89)	33 (13–56,5)	33 (11,5–69,5)	11 (0–41,25)	12 (0–33)
+ 0,36% ПФ + 0,36% PF	78 (64–89)	50 (36,75–67)#	44 (24,75–74,25) * #	22 (8,25–51,5)*	18 (8,25–54,25)
+ 0,6% ПФ + 0,6% PF	85 (76,5–89)	47 (29–78)#	44 (15.25–64,25)	33 (13,75–54,5)* #	33 (22–56)#

*Примечания: данные представлены в процентах по отношению к уровню до хранения, принятому за 100%; * – различие со значением показателя «сперма с глицерином» при соответствующем сроке хранения статистически значимо при p < 0,05; # – различие со значением показателя «+0,12%» при соответствующем сроке хранения статистически значимо при p < 0,05.*

*Notes: Data are presented as a percentage relative to the level before freezing, taken as 100%; * – the difference with the value of the indicator "sperm with glycerol" with the corresponding shelf life is statistically significant at p < 0.05; # – the difference with the value of the indicator "+ 0.12%" with the corresponding shelf life is statistically significant at p < 0.05.*

Таблица 2 / Table 2

Устойчивость к гипоосмотическому набуханию (HOS-тест)
Resistance to hypoosmotic swelling (HOS-test)

Раствор для хранения Storage solution	Сроки хранения (сут) / Storage periods (days)				
	3	6	7	8	9
Глицерин Glycerol	83 (76–91)	69 (60,5–80)	40 (28–56)	35 (31–51,5)	45 (42–64)
+ 0,12 % ПФ + 0,12% PF	86 (71,5–97,25)	65 (41–78)	35 (25,5)	35 (28,5–50)	39 (37,75–57)
+ 0,36% ПФ + 0,36% PF	83 (78,75–98,5)	78 (45,5–84)	29 (27–69,5)	41 (39,75–48,75)	38 (35–55)
+ 0,6% ПФ + 0,6% PF	81 (75–91)	69 (46,25–88,25)	35 (23–47,5)	41 (37,25–48,25)	45 (33–51)

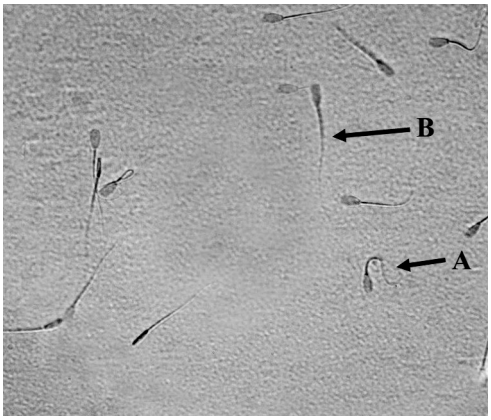


Рис. 3. Сперматозоиды быка с различной реакцией на гипоосмотическое воздействие:
А – устойчивый тип гамет (жизнеспособный),
В – неустойчивый тип гамет (нежизнеспособный)
Fig. 3. Bovine spermatozoa with different responses to hypoosmotic effects:
A – resistant type of gametes (viable), B – unstable gamete type (unviable)

Заключение

Проблема сохранения генетических ресурсов животного и растительного мира продолжает оставаться актуальной на протяжении многих лет. Предложенные ещё советскими учёными методы криоконсервирования спермы для искусственного осеменения сельскохозяйственных животных широко используются в мире. Состав и физико-химические свойства консервирующих сред являются определяющими при подготовке спермы к гипотермическому хранению или замораживанию. В свете современных представлений, поиск новых эффективных компонентов для консервирующих растворов должен быть ориентирован в первую очередь на природные соединения. Полученные в работе данные свидетельствуют о возможности применения ПФ гриба *H. erinaceus* BP16, в качестве перспективного компонента для замедления скорости кристаллизации льда в клеточных суспензиях при их замораживании, а также как антиоксидантного регулятора функциональной полноценности гамет сперматозоидов быка в условиях гипотермического (+6 °C) хранения.

Работа выполнена в рамках НИР № АААА-А17-117012310156-0 «Влияние пектинов на функциональную сохранность клеток при замораживании» и № 0767-2019-0090 «Изучить потенциал полифункционального действия мицелиальных микроорганизмов в региональных типах почв с целью создания новых препаратов для повышения адаптивности и экологической безопасности растениеводства и защиты окружающей среды от загрязнений».

References

1. He X., Wang X., Fang J., Chang Y., Ning N., Guo H., Zhao Z. Structures, biological activities, and industrial applications of the polysaccharides from *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom: A review // International Journal of Biological Macromolecules. 2017. V. 97. P. 228–237. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.040

2. Zan X., Cui F., Li Y., Yang Y., Wu D., Sun W., Ping L. *Hericium erinaceus* polysaccharide-protein HEG-5 inhibits SGC-7901 cell growth via cell cycle arrest and apoptosis // International Journal of Biological Macromolecules. 2015. V. 76. P. 242–253. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.01.060

3. Friedman M. Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds // J. Agric Food Chem. 2015. V. 63. No. 32. P. 7108–7123. doi: 10.1021/acs.jafc.5b02914

4. Thongbai B., Rapior S., Hyde K.D., Wittstein K., Stadler M. *Hericium erinaceus*, an amazing medicinal mushroom // Mycological Progress. 2015. V. 14. No. 10. P. 1–23. doi: 10.1007/s11557-015-1105-4

5. Holt W.V. Basic aspects of frozen storage of semen // Animal Reproduction Science. 2000. V. 62. P. 3–22. doi: 10.1016/s0378-4320(00)00152-4

6. Linnik T.P., Martynyuk I.N. Approaches to creation of cryoprotective media for cryopreservation of avian sperm // Problems of Cryobiology. 2010. V. 20. No. 2. P. 109–122.

7. Khudyakov A.N., Polezhaeva T.V., Zaitseva O.O., Gűnter E.A., Solomina O.N., Popeyko O.V., Shubakov A.A., Vetoshkin K.A. The cryoprotectant effect of polysaccharides from plants and microalgae on human white blood cells // Biopreserv Biobank. 2015. V. 13. No. 4. P. 240–246. doi: 10.1089/bio.2014.0077

8. Shirokikh I.G., Polezhaeva T.V., Shirokikh A.A., Khudyakov A.N., Sergushkina M.I., NazarovaYa.I., Paturova I.G. Cryoprotective properties of the polysaccharide fraction of the mushroom *Hericium erinaceus* BP 16 // Biology Bulletin. 2020. V. 47. No. 1. P. 1–6 (in Russian). doi: 10.1134/S1062359020010124

9. Schrago M.I., Guchok M.M., Kalugin Yu.V., Khanina L.A. Some ways to create ryoprotectants // Problems Hematol Blood Transfusion. 1981. No. 26. P. 3–6 (in Russian).

10. Svedentsov E.P. Cryoprotectants for living cell. Syktyvkar: Physiology Institute at the Komi Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010. 80 p. (in Russian).

11. York W.S., Darvil A.G., McNeil M., Stevenson T.T. Isolation and characterization of plant cell walls and cell-wall components // Methods in Enzymology. 1986. V. 118. P. 3–40.

12. Nie S., Cui S. W., Xie M. Bioactive polysaccharides. Academic Press, 2017. P. 8–17. doi: 10.1016/C2015-0-04574-9

13. Ferreira S.S., Passos C.P., Madureira P., Vilanova M., Coimbra M.A. Structure function relationships of immunostimulatory polysaccharides: a review // Carbohydr. Polym. 2015. V. 132. P. 378–396. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.04.011

14. Wang Z., Luo D., Liang Z. Structure of polysaccharides from the fruiting body of *Hericium erinaceus* Pers. // Carbohydrate polymers. 2004. V. 57. No. 3. P. 241–247. doi: 10.1016/j.carbpol.2004.04.018

15. Chen Y.Y., Xue Y.T. Purification, chemical characterization and antioxidant activities of a novel polysaccharide from *Auricularia polytricha* // Int. J. Biol. Macromol. 2018. V. 120. P. 1087–1092. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.08.160

16. Rong Y., Yang R.L., Yang Y.Z., Wen Y.Z., Liu S.X., Li C.F., Hu Z.Y., Chen X.R., Li W. Structural characterization of an active polysaccharide of longan and evaluation of immunological activity// Carbohydr. Polym. 2019. V. 213. P. 247–256. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.03.007

УДК 341:349.6

doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227

Парижское соглашение и «климатическая нейтральность»: роль сектора «Землепользование»

© 2021. Е. М. Гордеева[1, 2, 3, 4], д. ю. н., доцент,
В. Н. Пугач[2], к. э. н., доцент, ректор,
[1]Волго-Вятский институт (филиал)
Университета им. О. Е. Кутафина (МГЮА),
610002, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 99,
[2]Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
[3]Университет Хасселта,
3500, Бельгия, Мартеларенлаан, Хасселт Кампус, д. 42,
[4]Семинар по экологическому праву и праву территориального планирования,
Католический Университет Лювейна,
1348, Бельгия, г. Лювейн-ля-Нёв, Площадь Монтескьё, 2, B-250,
e-mail: yelena.gordeeva@uhasselt.be, em_gordeeva@vyatsu.ru

Достижение «климатической нейтральности», или «нулевых» выбросов парниковых газов (ПГ) – одна из наиболее актуальных целей по охране климата во всём мире. Однако ключевые элементы данной цели до сих пор не определены. И в этой связи, когда сегодня идёт активный процесс имплементации Парижского соглашения в национальные правовые системы, возникает множество практических вопросов, в том числе: что означает термин «климатическая нейтральность»? Каковы временные рамки для достижения этой цели? Какие группы «источников», «поглотителей» и ПГ учитывать в счёт достижения «нулевых» выбросов? Всё очевиднее становится, что для решения глобальной экологической проблемы изменения климата только сократить объёмы выбросов ПГ, конечно, недостаточно. Важный показатель – это поглощение ПГ. В этом контексте значимую роль играет сектор «Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования» («Землепользование»). Это единственный сектор, в котором происходят и выбросы ПГ, и их абсорбция. Россия обладает колоссальным потенциалом в секторе «Землепользование», поэтому вопросы о его роли в обеспечении климатической устойчивости и о том, как правовое регулирование в сфере землепользования может способствовать достижению «климатической нейтральности» являются особенно актуальными для нашей страны. В статье рассматривается состояние дел в области международного сотрудничества, направленного на охрану климата, выявляются актуальные вопросы для исследования. Так, в статье рассматриваются вопросы, связанные с определением ключевых элементов цели «климатическая нейтральность», даётся оценка роли сектора «Землепользование» в достижении «нулевых» выбросов и вносятся предложения о сферах правового регулирования, которые можно рассматривать для разработки мер, направленных на достижение «климатической нейтральности» в контексте сектора.

Ключевые слова: экологическое право, изменение климата, рамочный закон по охране климата, долгосрочные стратегии, выбросы парниковых газов, Парижское соглашение, международно-правовая охрана климата, климатическая нейтральность.

The Paris Agreement and "Climate neutrality": the role for "Agriculture, forestry and other land use" sector

© 2021. Y. M. Gordeeva[1, 2, 3, 4] ORCID: 0000-0003-4337-6721,
V. N. Pugach[2] ORCID: 0000-0003-1220-4062,
[1]Volgo-Vyatsky Institute of Kutafin University (MSAL),
99, Lenina St., Kirov, Russia, 610002,
[2]Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
[3]Hasselt University,
42, Campus Hasselt, Martelarenlaan, Belgium, 3500,
[4]Seminar on Environmental and Urban Planning Law
(SERES)Catholic University of Louvain,
B-250, 2, Place Montesquieu, Louvain-la-Neuve, Belgium, 1348,

e-mail: em_gordeeva@vyatsu.ru,
yelena.gordeeva@uhasselt.be

Achieving "climate neutrality" (or "net-zero greenhouse gas (GHG) emissions") has become one of the most relevant targets of climate change mitigation efforts worldwide. Yet, the important elements of this target remain uncertain. In this context, today, when countries implement the Paris Agreement into their national legal systems important practical questions arise: How to define "climate neutrality"? What is the time frame for its achievement? Which GHGs and which sectors to count towards achieving "net-zero GHG emissions"? More and more obvious becomes the fact that achieving this target requires not only rapid and deep GHG emissions reductions, but also the simultaneous protection and significant enhancement of GHG sinks, reservoirs and removals. In this context the "agriculture, forestry and other land use" (AFOLU) sector plays a crucial role. It is the single sector with significant potential for both, GHG emissions and their absorption. Russia's potential in this sector is tremendous. Therefore, the investigation into how legislation in the AFOLU sector can contribute to "climate neutrality" is of particular interest for the country. The article, firstly, sets the background by providing the state of affairs in the international climate protection cooperation efforts and highlighting the most pressing questions, which require research. Secondly, the article investigates the key elements which help to understand and define the "climate neutrality" target. Thirdly, the role of the AFOLU sector towards achieving "net-zero GHG emissions" is discussed. Fourthly, the article investigates the role of legislation contributing towards the "climate neutrality" target, focusing on the relevant legal areas for the AFOLU sector and suggesting their potential synergetic effect. Finally, the conclusion brings the findings of the article together, suggesting that achieving the "climate neutrality" target will require a broad range of policies and measures, including the "long-term low GHG emissions development strategies" (LTS) and legal frameworks, which, inter alia, need to take into consideration the AFOLU sector specificity and provide for appropriate safeguards. Further comparative research is required into the legal areas indicated in the article, in order to support climate protection in the AFOLU sector and promote synergies towards the "climate neutrality" target.

Keywords: environmental law, climate change, climate framework law, long-term strategies, Paris Agreement, international legal climate protection, climate neutrality.

Международное сотрудничество по борьбе с изменением климата: актуальное состояние дел

«Потепление климатической системы является неоспоримым фактом» – такой вывод содержится в пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), опубликованном в 2014 г. [1, с. 2]. Влияние человека на климатическую систему очевидно [1, с. 2]. Антропогенные выбросы парниковых газов (ПГ), вызванные в основном экономическим ростом и увеличением населения, возросли относительно доиндустриальной эпохи, и крайне вероятно, что именно эти выбросы являются основной причиной глобального потепления, наблюдаемого с середины XX века [1, с. 3]. «Имеются многочисленные пути смягчения воздействий на изменение климата, которые, вероятно, ограничат потепление величиной ниже 2 °C относительно доиндустриальных уровней», но, как предупреждает МГЭИК, «такие пути потребуют существенного сокращения выбросов ПГ в течение нескольких последующих десятилетий и близких к нулевым значениям выбросов CO_2 и других долгоживущих ПГ к концу столетия» [1, с. 5].

В 2015 г. было принято Парижское соглашение, направленное на «укрепление глобального реагирования на угрозу изменения климата» и обязывающее государства-участники сдерживать «прирост глобальной средней температуры намного ниже 2 °C сверх доиндустриальных уровней и прилагать «усилия в целях ограничения роста температуры до 1,5 °C, признавая, что это значительно сократит риски и воздействия изменения климата» [2, ст. 2.1а]. «Для достижения долгосрочной глобальной температурной цели государства-участники стремятся как можно скорее достичь глобального пика выбросов ПГ.., а также добиться впоследствии быстрых сокращений в соответствии с наилучшими имеющимися научными знаниями, в целях достижения сбалансированности между антропогенными выбросами из источников и абсорбцией поглотителями ПГ во второй половине этого века на основе справедливости и в контексте устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты» [2, ст. 4.1].

Стоит отметить, что во время переговоров в рамках подготовки Парижского соглашения такие формулировки как «углеродная нейтральность» и «нулевые» выбросы считались «политически спорными» и поэтому в окончательном тексте соглашения в 2015 г. была принята именно такая сложная формулировка, как «достижение сбалансированности между антропогенными выбросами из источников

и абсорбцией поглотителями ПГ». Более ранние проекты соглашения включали такие формулировки, как «сокращение выбросов на 70–95% к 2050 г. по сравнению с уровнем 2010 г., или 60–90% по сравнению с уровнем 1990 г.» [3].

Вслед за Парижским соглашением в 2018 г. МГЭИК выпустила ещё один специальный доклад, касающийся цели ограничения роста температуры до 1,5 °С [4]. В докладе МГЭИК предупредила, что деятельность человека уже вызвала потепление примерно на 1,0 °С и что, если потепление продолжится сегодняшними темпами, глобальное потепление, вероятно, достигнет 1,5 °С в период между 2030 и 2052 гг. [3, с. 5]. В отчёте МГЭИК подчёркивается, что удержание глобального потепления в рамках цели 1,5 °С требует сокращения глобальных антропогенных выбросов CO_2 примерно на 40–60% от уровня 2010 г. уже к 2030 г., достигнув «нулевого» уровня примерно к 2050 г. (а выбросы ПГ, не связанные с CO_2, – к 2070 г.) [4, с. 14].

После отчёта МГЭИК-2018 достижение «климатической нейтральности» (или «нулевых» выбросов ПГ) стало одной из наиболее актуальных целей по охране климата во всём мире. Так, в июне 2021 г., открывая пленарное заседание Петербургского международного экономического форума, Президент Российской Федерации (РФ) В.В. Путин подчеркнул: «Нет отдельного российского, европейского, азиатского или американского климата. У всех наших стран общая ответственность за современный мир, за жизнь будущих поколений... Чтобы решить проблему глобального потепления, только сократить объёмы выбросов, конечно, недостаточно. Для достижения так называемой «углеродной нейтральности» важный показатель – это поглощение парниковых газов. Нужно снизить их объём, который уже накопился в атмосфере, и здесь наша главная задача – научиться улавливать, хранить и полезно использовать углекислый газ от всех источников» [5].

В этом контексте сектор «Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования» («Землепользование») играет важную роль. По определению МГЭИК «сектор» – это группа взаимосвязанных процессов, источников и поглотителей, которые используются для оценки выбросов и поглощения ПГ. Так, основными секторами, которые применяются в целях международно-правового режима по охране климата на основе Рамочной Конвенции по изменению климата Организации Объединённых Наций (РКИК ООН [6]), являются такие сектора, как: «энергетика», «промышленные процессы», «сельское хозяйство», «отходы», и другие (например, сюда относятся косвенные выбросы от осаждения азота вне сектора «сельское хозяйство») [7].

«Землепользование» – это единственный сектор, в котором происходят выбросы ПГ и их абсорбция. Учёные отмечают, что управление ёмкостью земных поглотителей и накопителей («стоков» и «резервуаров» таких, как почвы, водно-болотные угодья, торфяники, мангровые заросли и леса), управление их способностью улавливать и накапливать ПГ, а также внедрение управленческих практик, которые позволяют в процессе землепользования сокращать выбросы ПГ и увеличивать абсорбцию в секторе «Землепользование» (например, борьба с лесными пожарами, отсутствие практик по переводу лесных земель в земли иных целевых назначений, наращивание площадей лесовосстановления и др.) – это ключ к достижению «климатической нейтральности» [8, 9].

Цели и задачи исследования

Сегодня идёт активный процесс имплементации Парижского соглашения в национальные правовые системы. Но в то время, как страны-участницы разрабатывают и реализуют национальные цели и меры по охране климата, стремясь к «нулевым» выбросам ПГ, возникает множество практических вопросов, в том числе: что такое «климатическая нейтральность»? Каковы временные рамки для достижения этой цели? Какие сектора и ПГ учитывать в рамках достижения цели «нулевых» выбросов? Какова роль международных проектов по обороту углеродных единиц в процессе достижения цели? [10]. Учёные исследуют как правовое регулирование в сфере землепользования (национальное, наднациональное, международное) может способствовать достижению «климатической нейтральности»? [11–13]. Для России эти вопросы особенно актуальны. «Россия обладает колоссальным поглощающим потенциалом лесов, тундры, сельхозземель, болот. Так, на нашу страну приходится пятая часть мировых лесов, которые занимают почти 10 млн км^2. По оценкам специалистов, учёных, уже сейчас они поглощают миллиарды т эквивалента CO_2 ежегодно... Значимость природного потенциала России для обеспечения климатической

устойчивости планеты в целом огромная, колоссальная просто» [5].

В этой связи, цель настоящего исследования состоит в комплексном анализе возникающих в ходе имплементации Парижского соглашения и обозначенных выше вопросов. В статье решаются следующие задачи: исследовать ключевые элементы цели «климатическая нейтральность», дать оценку роли сектора «Землепользование» в достижении «нулевых» выбросов и разработать предложения, какие сферы правового регулирования можно рассматривать для разработки мер, направленных на достижение «климатической нейтральности» в контексте сектора «Землепользование».

Объекты и методы исследования

Объектом настоящего исследования являются международные отношения в области охраны климата. Предмет исследования составляет совокупность правовых норм, принципов и механизмов Парижского соглашения 2015 г., регулирующих отношения по достижению «климатической нейтральности» («нулевых» выбросов), а также выявление роли сектора «Землепользование» в этом процессе. Методологической 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. В числе информационных источников исследования использованы отчёты, статистические материалы и доклады международных межправительственных организаций системы ООН, международных неправительственных организаций, национальных органов власти, а также аналитические отчёты и материалы конференций по вопросам изменения климата, представленные на официальных сайтах в сети Интернет. Поиск материалов производили в системе «Яндекс» по словам и словосочетаниям, являющимся ключевыми для настоящей статьи. Охвачен временной период с момента подготовки Парижского соглашения 2015 г. до настоящего времени. Основные результаты исследования были представлены на 64 ежегодном собрании Российской ассоциации международного права (28–29 июня 2021, г. Москва) [14].

Что такое «климатическая нейтральность»?

Первый нюанс связан непосредственно с формулировкой цели. В процессе глобального потепления участвуют многие ПГ. Например, по оценкам МГЭИК, основным определяющим фактором изменения температуры в нашем столетии являются кумулятивные выбросы углекислого газа (CO_2): «ограничение повышения глобальной температуры требует того, чтобы глобальные выбросы CO_2 стали «нулевыми» в какой-то момент в будущем» [15]. Но в то же время, к выбросам ПГ, влияющим на изменение глобальной температуры относят и выбросы ПГ, не связанных с CO_2: выбросы метана (CH_4), оксида азота (I) (N_2O), гидрофторуглеродов ($C_xF_yH_z$), перфторуглеродов (C_xF_y), гексофторида серы (SF_6), трифторида азота (NF_3) и др. Хотя некоторые из этих ПГ «короткоживущие» и не аккумулируются в атмосфере надолго (например, метан, гидрофторуглероды и др.), такие ПГ всё равно оказывают значительное влияние на изменение климата. По оценкам МГЭИК практически все траектории выбросов ПГ, соответствующие глобальному потеплению на 1,5 °С, предусматривают достижение «нулевых» выбросов в период между 2050 г. (выбросы CO_2) и 2070 г. (выбросы ПГ, не связанные с CO_2) [4].

Второй нюанс относится к терминологии. Как в публичных, так и в частных правоотношениях сегодня используется широкий спектр терминов для обозначения схожих целей в области охраны климата, в том числе: «климатическая нейтральность», «нулевая эмиссия», «нулевые выбросы», «углеродная нейтральность», «глубокая декарбонизация» [16]. Часто эти термины используются взаимозаменяемо, а стандартизированные определения отсутствуют. Так, например, термин «углеродная нейтральность» может означать исключительно «нулевые выбросы CO_2», в то время как термин «климатическая нейтральность» может учитывать выбросы всех ПГ (CO_2 и выбросы ПГ, не связанные с CO_2). Также важен уровень цели: международный и/или национальный? Если на глобальном уровне термин «нулевые» выбросы ПГ» относится к глобальной «сбалансированности между антропогенными выбросами из источников и абсорбцией поглотителями ПГ» на протяжении определённого периода (как правило, одного года), то на национальном уровне термин «нулевые» выбросы ПГ» может означать баланс выбросов ПГ из источников и абсорбции ПГ

поглотителями на национальной территории в отчётном году. Как правило, баланс выбросов и абсорбции ПГ измеряется в условных единицах «CO_2-эквивалент». В дальнейшем, в зависимости от того, какое определение даётся выбранному термину, баланс выбросов и абсорбции ПГ на определённой территории за установленный промежуток времени может быть «нулевым», «положительным» (когда ежегодная эмиссия ПГ выше их абсорбции поглотителями) и «отрицательным» (когда ежегодная эмиссия ПГ ниже их абсорбции поглотителями). Кроме того, важными элементами «климатической нейтральности» являются временные рамки (например, количество лет, когда цель должна быть достигнута), сфера действия цели (частичный или полный учёт ПГ), а также возможность (или невозможность) использовать углеродные единицы, полученные в ходе реализации международных проектов, для достижения цели.

Достижение «климатической нейтральности» непосредственно связано с исполнением странами-участницами Парижского соглашения своего обязательства по формулированию национальных «долгосрочных стратегий развития с низким уровнем выбросов ПГ» [2, ст. 4.19]. Стратегии представляют собой важный инструмент, с помощью которого страны выражают своё видение по достижению «климатической нейтральности» к 2050 г. с учётом принципа «устойчивого развития». Такие стратегии должны были быть направлены в адрес секретариата РКИК ООН ещё в 2020 г. [17, 18]. Но, по состоянию на 14 июня 2021 г., лишь 29 из 196 сторон-участниц Парижского соглашения (28,2% глобальной эмиссии ПГ) направили соответствующие стратегии в адрес секретариата РКИК ООН. Большому количеству стран, в том числе и России, всё ещё только предстоит разработать такие долгосрочные стратегии. Странам рекомендуется согласовывать вновь сформулированные стратегии с ранее направленными в адрес секретариата РКИК ООН «Определяемыми на национальном уровне вкладами» (ОНУВ) [2, ст. 2.4] и национальными целями по достижению «климатической нейтральности» [18, 19].

Достижение «климатической нейтральности» очень остро стоит на глобальной повестке дня не только из-за соответствующих обязательств, взятых государствами в рамках Парижского соглашения, но и из-за того, что человечество очень быстро движется к «катастрофическому» повышению температуры. Так, доклад программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) «О разрыве в уровне выбросов 2020 года» показал, что «несмотря на вызванное эпидемией COVID-19 кратковременное снижение уровня выбросов углекислого газа, в этом столетии мир всё ещё движется к повышению температуры более чем на 3 °C» [19]. Сегодня эту тенденцию всё ещё можно изменить. Ожидается, что после апрельского «Климатического саммита лидеров государств» страны-участницы Парижского соглашения будут более охотно принимать на себя новые амбициозные обязательства по сокращению выбросов ПГ [20, 21]. Кроме того, глобальное сокращение выбросов ПГ из-за пандемии COVID-19 позволяет воспользоваться моментом, при условии, что экономическое восстановление после пандемии будет сопряжено с глубокой декарбонизацией и интеграцией мер по низкоуглеродному развитию, в том числе в обновлённые ОНУВ и в «национальные долгосрочные стратегии развития с низким уровнем выбросов ПГ». Эти документы должны быть направлены в секретариат РКИК ООН в рамках подготовки 26-ой конференции сторон конвенции осенью 2021 г.

Роль сектора «Землепользование» в достижении «нулевых» выбросов

Для достижения «климатической нейтральности» сектор «Землепользование» является ключевым. В своём специальном докладе МГЭИК отмечает, что «Земля обеспечивает главную основу для жизнеобеспечения и благосостояния людей, включая снабжение продовольствием, пресной водой и множеством других экосистемных услуг, а также биологическое разнообразие» [9, с. 7]. Используя ресурсы на свои нужды, человечество уже оказало непосредственное влияние на более чем 70% свободной ото льда земной поверхности [9, с. 7]. Землепользование может являться одновременно источником и поглотителем ПГ, в силу как естественных (например, лесные пожары), так и антропогенных (например, вырубка лесов) факторов [9, с. 10]. По оценкам МГЭИК, в результате деятельности человека во всем мире в период с 2007 по 2016 гг. на деятельность в области землепользования приходилось около 13% выбросов CO_2, 44% выбросов CH_4 и 81% выбросов N_2O, что составляет 23% от суммарных чистых антропогенных выбросов ПГ [9, с. 10]. Это значительный показатель (для сравнения, на сектор «транспорт» приходилось около 13% выбросов ПГ). Более того, по оценкам Всемир-

ной продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), в ближайшем будущем в условиях ожидаемого увеличения спроса на сельскохозяйственную продукцию в секторе «Землепользование» ожидается резкий рост выбросов ПГ [23].

Сельское хозяйство уже входит в число секторов, наиболее страдающих от тяжёлых негативных воздействий изменения климата. Экстремальные погодные явления уже оказывают глубокое влияние на производительность в сельском хозяйстве во всём мире. Вероятно, что в будущем такие погодные явления будут более частыми и более интенсивными. Ожидается, что после 2030 г. негативное воздействие изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур усугубится во всех регионах мира. Продовольственная безопасность в значительной степени будет зависеть от того, в какой мере удастся сократить выбросы ПГ [23].

С другой стороны, потенциал сельского хозяйства в процессе предотвращения изменений климата огромен – около 6 млрд т CO_2 в год. Около 90% этого потенциала – это использование и развитие таких естественных практик поглощения ПГ, как секвестрация углерода, агролесоводство, севообороты, управление отходами (в том числе содержание скота, хранение, обработка и внесение в почву удобрений), восстановление деградировавших земель и др. [24]. В последнее время особенно актуальным становится использование потенциала «природных решений» («решений на основе природных ресурсов», «nature-based solutions»), «зелёной инфраструктуры» и использования «экосистемных услуг» [24].

В достижении «климатической нейтральности» важная роль принадлежит лесному хозяйству. С одной стороны, леса – это естественный способ поглощения CO_2 (лесовосстановление, устойчивое управление лесами, охрана «первичных» лесов и др.), с другой стороны, обезлесение и деградация лесов (лесные пожары, конверсия лесных земель в земли иного целевого назначения, вырубка лесов и др.) – это крупный источник выбросов ПГ в атмосферу. Так, МГЭИК отмечает, что все траектории в климатических моделях свидетельствуют о том, что ограничение антропогенного изменения климата на уровне ниже 2 °C потребует увеличения площади лесов возможно до 9,5 млн км^2 к 2050 г. относительно 2010 г. [4, с. 18]. Но, как показывает практика имплементации лесных проектов в рамках «СВОД+» («СВОД+» – «Сокращение выбросов в результате обезлесения и деградации лесов и роль сохранения, устойчивого управления лесами и увеличения накоплений углерода в лесах в развивающихся странах», механизм сохранения и наращивания углеродопоглащающего лесного фонда в рамках международно-правового режима по охране климата [2, ст. 5.2]), использование потенциала лесов в климатических целях осложнено спецификой управления лесным хозяйством [25].

Согласно докладу Межправительственной научно-политической платформы по биоразнообразию и экосистемным услугам (МПБЭУ), «широкомасштабное внедрение плантаций выращивания сырья для биотоплива и облесение нелесных экосистем может иметь негативные побочные последствия для биоразнообразия и экосистемных функций. Согласно оценкам, «природные решения» обеспечат реализацию 37% мер по предотвращению изменений климата в период до 2030 г., необходимых для достижения цели ограничения прироста температуры ниже 2 °C, с вероятными сопутствующими выгодами для биоразнообразия... Однако широкомасштабное создание плантаций, интенсивное выращивание сырья для биотоплива, в том числе монокультур, вместо естественных лесов и угодий для ведения натурального хозяйства, вероятно, будет оказывать негативное воздействие на биоразнообразие и может создавать угрозу продовольственной и водной безопасности, а также местным средствам к существованию, в том числе в результате обострения социальных конфликтов» [26].

Сферы правового регулирования для разработки мер, направленных на достижение «климатической нейтральности», в контексте сектора «Землепользование»

Достижение такой глобальной цели, как «климатическая нейтральность», требует широкого спектра правовых мер, в том числе долгосрочных стратегий, рамочного законодательства, направленного на охрану климата; применение экономических стимулов (например, налогов на выбросы ПГ, субсидирование «зелёных» решений, налоговые льготы и др.); фиксации чётких нормативов и целевых показателей в нормативных актах и т. д. Учёные отмечают, что для продвижения климатической повестки особенно важны именно рамочные законы, направленные на охрану климата

[8, с. 8]. Такие законы могут устанавливать не только юридически обязательные правила поведения субъектов в области отношений по охране климата, но и механизмы контроля, принуждения к соблюдению таких правил, а также могут учреждать необходимые институты. Многие страны мира уже приняли рамочное законодательство, направленное на охрану климата, и эта тенденция стремительно набирает темпы, становясь общемировым трендом [27]. Как показывает практика, рамочные законы, направленные на охрану климата, имеют ряд общих элементов: юридически обязательная цель по снижению выбросов ПГ, установленный лимит/бюджет выбросов ПГ, механизмы оценки прогресса по достижению целей и др. Так, по оценкам экспертов, сегодня уже более 30 стран мира закрепили свои национальные цели по достижению «нулевых» выбросов в соответствующих законах и/или иных национальных нормативно-правовых актах [28]. Что касается России, представляется, что вопросы противодействия изменению климата не находят достаточного отражения в действующем законодательстве [29, 30].

Важна и роль институтов, которые осуществляют продвижение климатической повестки дня и координацию всех усилий, направленных на охрану климата (в том числе, принимают участие в согласовании соответствующих целей, в закреплении целей в действующем законодательстве, обеспечении контроля и принуждения в процессе достижения целей и т. д.). В частности, важна роль независимых консультативных органов. Один из наиболее известных таких органов – это Комитет по изменению климата Великобритании, действующий с 2008 г. Он наделён полномочиями консультировать Правительство Великобритании о необходимых мерах по предотвращению изменения климата, а также рассматривать отчёты Правительства о том, что было достигнуто в результате его деятельности по данному вопросу [31].

Правовое регулирование в смежных сферах также будет иметь важное значение для достижения целей по охране климата [32]. В частности, для такого сектора, как «Землепользование», к смежным сферам правового регулирования можно отнести: 1) регулирование в сфере земельных отношений (в том числе управление землями сельскохозяйственного назначения, лесного фонда и др.); 2) регулирование, направленное на снижение выбросов ПГ (например, борьба с лесными пожарами, контроль над изменением целевого назначения земель, территориальное планирование и др.); 3) регулирование, направленное на развитие и защиту естественных «поглотителей» ПГ (например, создание особо охраняемых природных территорий, устойчивое управление лесами, лесовосстановление и др.); 4) регулирование в сфере возобновляемых источников энергии и использования биомассы (например, древесная биомасса как возобновляемый источник энергии [33]); 5) регулирование в области прав и основных свобод человека (например, право на благоприятную окружающую среду, право на частную собственность, социально-экономические права и т. д.).

Заключение

Достижение «климатической нейтральности» очень остро стоит на глобальной повестке дня. Это связано с объективной реальностью – человечество очень быстро движется к «катастрофическому» повышению температуры, когда изменения климата невозможно будет обратить. В целях охраны климата уже идёт активный процесс имплементации Парижского соглашения в национальные правовые системы. В этой связи появляется множество практических вопросов, на которые международному сообществу ещё предстоит найти ответы. Один из таких вопросов связан с определением ключевых элементов глобальной цели по достижению «климатической нейтральности» («нулевых» выбросов), в том числе: что означает термин «климатическая нейтральность»? Каковы временные рамки для достижения этой цели? Какие группы «источников», «поглотителей» и ПГ учитывать в счёт достижения «нулевых» выбросов? Для того чтобы международному сообществу ответить на эти вопросы, важным шагом является своевременное исполнение государствами-участниками Парижского соглашения своего обязательства по разработке национальных «долгосрочных стратегий развития с низким уровнем выбросов ПГ». В такой стратегии каждое государство может сформулировать своё видение по переходу к низкоуглеродной экономике к 2050 г. Большому количеству стран, в том числе и России, всё ещё только предстоит разработать такие долгосрочные стратегии. Ожидается, что они будут направлены в секретариат РКИК ООН в рамках подготовки 26-ой конференции сторон конвенции осенью 2021 г. В будущем, возможно, что отдельные положения таких

национальных стратегий будут положены в основу международных обязательств по достижению «нулевых» выбросов.

Несмотря на текущую неопределённость с ключевыми элементами глобальной цели, уже сегодня ясно, что для достижения «климатической нейтральности» требуется широкий спектр правовых мер, в том числе долгосрочные стратегии, рамочное законодательство, направленное на охрану климата, и соответствующее регулирование в смежных сферах. Учёные подчеркивают, что ключевую роль в продвижении климатической повестки дня играют именно рамочные законы, направленные на охрану климата. В данной статье акцент сделан на исследовании роли сектора «Землепользование» в достижении «климатической нейтральности». Учёные уже отмечают его ключевую роль в достижении глобальной цели по охране климата. Но специфика сектора такова, что использование его потенциала в климатических целях осложнено и, более того, как показывает практика, может оказывать негативное воздействие на биоразнообразие, создавать угрозу продовольственной и водной безопасности, а также местным средствам к существованию. Эту специфику сектора необходимо учитывать и предусматривать соответствующие правовые гарантии, в том числе и в рамочном законодательстве, направленном на охрану климата.

Помимо долгосрочных стратегий и соответствующего рамочного законодательства для достижения цели «нулевых» выбросов также важно использовать и синергетический эффект в отношении охраны климата от правового регулирования в смежных сферах. В статье предложены сферы правового регулирования, которые можно рассматривать для разработки мер, содействующих достижению «климатической нейтральности» в контексте землепользования. Приведённый в статье перечень сфер правового регулирования не является исчерпывающим. Но даже в отношении перечисленных сфер правового регулирования требуются дальнейшие сравнительно-правовые исследования, которые, с одной стороны, позволят проанализировать уже имеющийся мировой опыт по использованию потенциала сектора «Землепользование» в климатических целях, с другой стороны, в рамках отдельной национальной правовой системы, такие исследования позволят проанализировать: как регулирование в этих сферах осуществлялось в прошлом? Какие уроки можно извлечь на будущее? Как можно усовершенствовать регулирование этих сфер для того, чтобы достичь максимального эффекта в борьбе с изменением климата и скорейшего достижения «климатической нейтральности», в том числе с использованием «колоссального потенциала» сектора «Землепользование»?

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2014, synthesis report [Internet resource] https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_ru.pdf (Accessed: 01.06.2021).

2. 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).

3. Guide to the Paris Agreement / Ed. A. Sharma. Oxford Climate Policy/ecbi, 2020. 160 p.

4. IPCC. Global warming of 1,5 °C, summary for policymakers [Internet resource] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_ru.pdf (Accessed: 12.06.2021) (in Russian).

5. 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).

6. 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).

7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. V. 1. General guidance and reporting [Internet resource] https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf (Accessed: 12.06.2021).

8. de Andrade C.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. P. 1–12. doi: 10.21552/cclr/2021/1/3

9. IPCC. Climate Change and Land, An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 2020 [Internet resource] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf (Accessed: 10.06.2021).

10. World Resources Institute. Working paper. Levin K., Rich D., Ross K., Fransen T., Elliott C. Designing and communicating net-zero targets. 2020. 30 p. [Internet resource] https://files.wri.org/d8/s3fs-public/designing-communicating-net-zero-targets.pdf (Accessed: 12.06.2021).

11. Chen Y. How does China's land use system respond to climate change? // Carbon & Climate Law Review. 2021. V. 15. No. 1. P. 36–48. doi: 10.21552/cclr/2021/1/6

12. Savaresi A., Perugini L. Balancing emissions and removals in the land sector: the view from the EU // Carbon & Climate Law Review. 2021. V. 15. No. 1. P. 49–59. doi: 10.21552/cclr/2021/1/7

13. International Union for Conservation of Nature (IUCN). World commission on environmental law, Getting to zero, Climate change mitigation and land use – a study of policy options for balancing emissions and removals [Internet resource] https://www.iucn.org/commissions/world-commission-environmental-law/our-work/climate-change/getting-zero (Accessed: 12.06.2021).

14. Volgo-Vyatsky Institute of Kutafin University – Assistant professor dr Yelena M. Gordeeva presents at the Russian Association of International Law [Internet resource] http://msalkirov.ru/institute/news/2471-dotsent-volgo-vyatskogo-instituta-universiteta-imeni-o-e-kutafina-mgyua-elena-gordeeva-vystupila-s-dokladom-na-sobranii-rossijskoj-assotsiatsii-mezhdunarodnogo-prava.html (Accessed: 20.08.2021) (in Russian).

15. IPCC. Global warming of 1.5 °C. 2019. 108 p. [Internet resource] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf (Accessed: 12.06.2021).

16. NewClimate Institute & DataDriven EnviroLab. Navigating the nuances of net-zero targets. 2020. V. 10. 74 p. [Internet resource] https://newclimate.org/wp-content/uploads/2020/10/NewClimate_NetZeroReport_October2020.pdf (Accessed: 12.06.2021).

17. UNFCCC. Communication of long-term strategies [Internet resource] https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies (Accessed: 12.06.2021).

18. Climate Watch. Explore long-term strategies (LTS), explore nationally determined contributions [Internet resource] https://www.climatewatchdata.org/ndcs-explore (Accessed: 12.06.2021).

19. United Nations Environment Program (UNEP). Emissions gap report 2020 [Internet resource] https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34438/EGR20ESR.pdf?sequence=29 (Accessed: 12.06.2021) (in Russian).

20. Gasuk A. Who orders the weather // Russian newspaper. 2021. No. 88 (8439) [Internet resource] https://rg.ru/2021/04/22/otkrylsia-klimaticheskij-sammit-liderov-40-gosudarstv.html (Accessed: 14.06.2021) (in Russian).

21. Earth.Org. The leader's summit on Climate 2021: A summary [Internet resource] https://earth.org/leaders-summit-on-climate-2021-a-summary/ (Accessed: 14.06.2021).

22. UNFCCC. Glasgow climate change conference [Internet resource] https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/glasgow-climate-change-conference (Accessed: 14.06.2021).

23. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Climate change and agriculture [Internet resource] http://www.fao.org/3/i6030r/I6030R.pdf (Accessed: 14.06.2021) (in Russian).

24. Gordeeva Y.M. Uncertainty and multifunctionality: legal challenges and opportunities for "Green infrastructure" // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 211–217 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-217-223

25. Van Asselt H. Managing the fragmentation of international environmental law: forests at the intersection of the climate and biodiversity regimes // New York University Journal of International Law and Politics. V. 44. No. 4. P. 1205–1278 [Internet resource] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1703186 (Accessed: 14.06.2021).

26. IPBES. Summary for Policymakers of the Global Assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science-based policy platform on biodiversity and ecosystem services [Internet resource] https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_ru.pdf (Accessed: 15.06.2021) (in Russian).

27. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. Climate Change Law of the World [Internet resource] https://climate-laws.org/legislation_and_policies (Accessed: 15.06.2021).

28. World Resources Institute. What does "net-zero emissions" mean? 8 Common questions, answered [Internet Resource] https://www.wri.org/insights/net-zero-ghg-emissions-questions-answered (Accessed: 22.06.2021).

29. Solntsev A.M. Climate change: International legal dimension // Moscow Journal of International Law. 2018. No. 1. P. 60–78 (in Russian). doi: 10.24833/0869-0049-2018-1-60-78

30. Gordeeva Y.M. The Russian Federation and the International Climate Change Regime // Carbon and Climate Law Review. 2014. V. 3. No. 8. P. 167–174 [Internet resource] https://www.jstor.org/stable/24324310 (Accessed: 22.06.2021).

31. Quere C.L. Evidence-led climate policy and robust climate governance are key to delivering the Paris Agreement [Internet resource] https://www.theccc.org.uk/2020/10/29/evidence-led-climate-policy-and-robust-climate-governance-are-key-to-delivering-the-paris-agreement (Accessed: 15.06.2021).

32. FAO. Agriculture and climate change: law and governance in support of climate smart agriculture and international climate change goals, 2020 [Internet resource] http://www.fao.org/3/cb1593en/CB1593EN.pdf (Accessed: 15.06.2021).

33. Gordeeva Y.M. Wood biomass sustainability under the renewable energy directive in // Sustainable energy united in diversity: Challenges and approaches in energy transition in the EU / Eds. L. Squintani, H. Vedder, B. Vanheusden, Reese M. European Environmental Law Book Series, 2014 [Internet Resource] https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/15871416/First_EELF_Book_Sustainable_Energy_United_in_Diversity_1_.pdf (Accessed: 15.06.2021).

УДК 631.4 doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-228-236

Биотопливо или дымящие автомобили?

© 2021. В. А. Лиханов, д. т. н., профессор, О. П. Лопатин, д. т. н., профессор,
Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133,
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Обоснована необходимость использования экологичного биотоплива для автотранспортных средств. Проанализированы возможности и пути использования в них биотоплива на основе спиртов (метанола, этанола), рапсового масла и метилового эфира рапсового масла. Рассмотрены физические процессы, доказывающие эффективность и надёжное снижение сажесодержания в выхлопных газах (ВГ) автомобилей при использовании указанных биотоплив. Для глубокого понимания основных механизмов образования сажевых частиц рассмотрены процессы их роста, морфология и микроструктура агрегатных состояний. Описаны снимки агломератов частиц сажи, сделанных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, характеризующие как более, так и менее разветвлённые агрегаты, состоящие из десятков и сотен сферических или почти сферических первичных частиц. Доказано, что объединение (слипание) сажевых частиц до гранул является техническим моментом удаления агрегатной структуры, которая и определяет характер рассеивания первичных частиц.

Представлены результаты теоретических исследований дымности ВГ дизелей, работающих на биотопливе с помощью расчётного метода по ацетиленовой теории. Экспериментально получено эффективное снижение не только дымности ВГ двигателей путём применения экологических биотоплив, но и уменьшение практически всего спектра токсичных компонентов при сохранении мощностных показателей работы двигателя. При этом необходимо отметить полное (на 100%) замещение нефтяного моторного топлива альтернативным, что является безусловным преимуществом данных двигателей перед своими «коллегами», работающими на нефтяных топливах.

Ключевые слова: биотопливо после двигателя, автомобиль, двигатель, метанол, этанол, рапсовое масло.

Biofuels or smoking cars?

© 2021. V. A. Likhanov ORCID: 0000-0003-3033-7176, O. P. Lopatin ORCID: 0000-0002-0806-6878,
Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

The necessity of using eco-friendly biofuels for motor vehicles is justified. The possibilities and ways of using biofuels based on alcohols (methanol, ethanol), rapeseed oil and rapeseed oil methyl ether are analyzed. The physical processes that prove the effectiveness and reliable reduction of soot content in the exhaust gases (EG) of cars when using these biofuels are considered. For a deep understanding of the main mechanisms of formation of soot particles, the processes of their growth, morphology and microstructure of aggregate states are considered. Images of soot particle agglomerates taken using high-resolution transmission electron microscopy are described, which characterize both more and less branched aggregates consisting of tens and hundreds of spherical or almost spherical primary particles. It is proved that the union (coalescence) of soot particles to granules is the technical moment of removing the aggregate structure, which determines the nature of the dispersion of primary particles.

The results of theoretical studies of the smoke content of EG diesel engines running on biofuels using the calculation method according to the acetylene theory are presented. An effective reduction of not only the smoke content of EG engines through the use of ecological biofuels, but also a reduction of almost the entire spectrum of toxic components while maintaining the power performance of the engine was experimentally obtained. At the same time, it is necessary to note the complete (100%) replacement of oil motor fuel with alternative fuel, which is an absolute advantage of these engines over their "colleagues" working on oil fuels.

Keywords: biofuel engine, car, engine, methanol, ethanol, rapeseed oil.

Неизбежность экологического и энергетического кризисов, вызванных неуклонным ростом потребления исчерпаемых энергоресурсов, вынуждает человечество искать альтернативные возобновляемые источники энергии и пути снижения энергозависимости от исчерпаемых топлив [1–3].

Несмотря на повсеместное внедрение энергосберегающих технологий, суммарное мировое потребление энергии человечеством

растёт. К 2040 г. основным энергетическим источником на планете останутся исчерпаемые углеводороды (рис. 1) [4, 5].

По оценкам международного энергетического агентства доля биотоплив к 2050 г. в транспортной сфере может возрасти до 750 млн т в нефтяном эквиваленте и составить 27% всего топлива, используемого транспортом [6].

Россия обладает значительным потенциалом в области развития производства возобновляемых источников энергии, в том числе крупнейшей в мире площадью пахотных земель. В энергетической стратегии России на период до 2030 г. отмечается необходимость обеспечить рациональный, экономически обоснованный рост использования альтернативных видов топлива для транспорта и энергетики [7, 8].

Перспективным направлением развития современной энергетики является использование биотопливных технологий, доля которых в мировой структуре потребления топлив неуклонно растёт. Одним из основных потребителей энергии традиционно является транспортная отрасль, на которую приходится более четверти от общего потребления. При этом доля нефти и нефтепродуктов в структуре потребления топлива автомобильным транспортом в развитых странах составляет до 95% [9].

Повышенная экологическая опасность нефтяных топлив и продуктов их сгорания в городах-миллионниках и не только представляет собой проблему, решение которой может быть только комплексным, включающим в себя создание новых биотоплив с экологически улучшенными характеристиками. Конвертация автомобиля с нефтяного на биотопливо позволит существенно снизить экологическую нагрузку особенно в мегаполисах, снижая экологический ущерб, наносимый окружающей среде (ОС), связанный с применением традиционных нефтяных топлив. Но для повсеместного применения биотоплива на автотранспорте необходимо должным образом обеспечить требуемые условия для его сгорания в сердце автомобиля – его двигателе [10].

Существуют два направления влияния на процессы сгорания топлива в двигателе автомобиля: изменение состава топлива и изменение процесса его сгорания. Первая проблема решается путём замены топлива на альтернативное либо введения в его состав различных добавок, улучшающих его экологические характеристики, вторая – путём введения присадок – катализаторов горения топлива. В качестве добавок или заменителей к нефтяному топливу особое место находят кислородсодержащие соединения – оксигенаты – простые алифатические спирты (метанол, этанол) и их эфиры. Добавки оксигенатных топлив в нефтяное топливо позволяют улучшить процесс сгорания, а, следовательно, снизить выбросы выхлопных газов (ВГ) в атмосферу. Использование кислородсодержащих добавок в топливе для автомобиля во многих странах мира заложено в государственные программы, предусматривающие улучшение

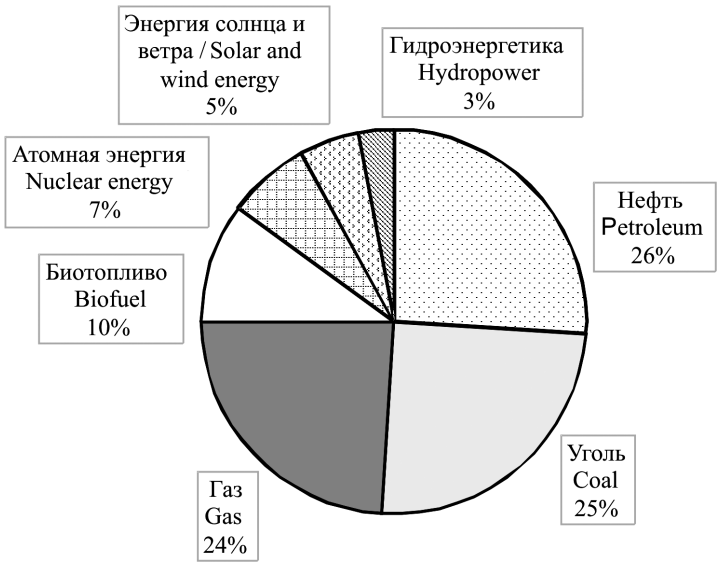


Рис. 1. Прогноз международного энергетического агентства на общемировое энергопотребление к 2040 г. / **Fig. 1.** International Energy Agency forecast for global energy consumption by 2040

экологической обстановки и использование в производственном цикле возобновляемых источников сырья. С этой точки зрения как нельзя лучше подходит метанол или этанол, получаемые из растительной биомассы и другими путями. Так, например, в Бразилии 90% всех выпускаемых двигателей рассчитаны на применение спиртовых топлив [11, 12].

При менее сложной структуре и меньших размерах молекул метанола и этанола во время их сгорания, в процессе распада снижается количество промежуточных химических соединений, которые могут являться токсичными. Кроме того, благодаря снижению содержания углерода по отношению к водороду, в процессе сгорания спиртовых биотоплив в меньшем количестве образуются оксиды углерода. По этой причине спирты во время их сгорания не в такой степени, как нефтяное топливо, дымят и тем самым загрязняют ОС. Поэтому для надёжного снижения дымности ВГ автомобилей очень важную роль играет рассмотрение сложного механизма образования сажевых частиц [13].

Всестороннее изучение процессов сажеобразования в двигателе автомобиля связано с негативным воздействием этого явления на ОС. Сажа, выбрасываемая с ВГ, способна на своей поверхности адсорбировать другие продукты неполного сгорания топлива, в том числе вещества, обладающие канцерогенными свойствами. При быстром охлаждении часть высокомолекулярных углеводородов (в том числе бенз[а]пирен) не успевает пройти все стадии процесса окисления и осаждается на поверхности сажевых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи. Принято считать, что на 1 г сажи может конденсироваться более 1 мг бенз[а]пирена, который является канцерогеном первого класса опасности. Также в образцах сажи из ВГ автомобиля обнаруживаются тяжёлые углеводороды, сконденсированные в агломераты и превращённые в смолистые вещества [14, 15].

Попадая в атмосферу, частицы сажи, отличающиеся высокой стабильностью, способны несколько суток витать в воздухе, увеличивая тем самым опасность для человека. Попадая в лёгкие, вызывают раздражение, способствуют появлению злокачественных новообразований. Частицы малых размеров не выводятся из организма. Исследования показали, что сельскохозяйственные растения способны в значительном количестве улавливать сажу, которая существенно влияет на водный режим растений, снижая содержание воды в листьях на 10–40% и увеличивая водный дефицит растений на 5–20% [16].

Целью работы является изучение снижения дымности ВГ автомобилей при использовании биотоплива.

Биотопливо

Существует множество способов снижения дымности автомобилей. Один из эффективных методов – применение биотоплива. Самые распространённые виды биологического топлива в мире – биоэтанол и биометанол, на которые приходится более 80% всего производимого в мире топлива из биологического сырья. Обеспечить производство этого спиртового биотоплива в России способен широкий спектр сырья пищевой и перерабатывающей промышленности. Главным образом это сахаро-, крахмалосодержащее сырьё и целлюлозосодержащая продукция (отходы переработки зерна, древесины, соломы и др.). Необходимо отметить, что топливный этанол, в отличие от пищевого, производится методом укороченной дистилляции, поэтому содержит метанол и сивушные масла, а также бензин, что снижает стоимость его производства и делает хорошей альтернативой традиционному топливу [17].

Широкое применение спиртов в качестве моторного топлива для автомобилей сдерживается тем обстоятельством, что по ряду физико-химических свойств они существенно отличаются от штатного топлива. Так, если мы говорим о биоэтаноле и биометаноле, то их цетановые числа в 7 и 11 раз ниже дизельного топлива, что требует специальных мер для воспламенения этих биотоплив в двигателе. Поэтому при использовании спиртовых биотоплив в дизелях используют различные присадки, изменяют конструктивные параметры дизеля (изменение формы камеры сгорания, увеличение степени сжатия, повышение температуры воздушного заряда), используют свечи накаливания или зажигания, запальную (пилотную) порцию топлива и др. Но, с другой стороны, известно, что популярные среди автолюбителей бензины марок «Регуляр 92» и «Премиум 95» имеют значения октанового числа не более 92 и 95 соответственно. Октановое же число биоэтанола 108, а биометанола – 120, поэтому очевидно, что склонность к самовоспламенению этих спиртов ниже, а скорость горения их газовоздушных смесей выше [18].

Применением биоспирта в двигателе автомобиля можно добиться существенного

снижения дымности ВГ. Чем больше доля используемого спирта, тем меньше содержание сажи в ВГ. Сажеобразование при горении биоспиртов интенсифицируется по мере повышения их молекулярной массы. Биометанол при горении не образует сажи, а в продуктах сгорания биоэтанола содержание сажи незначительно. Биоэтанол и биометанол обладают высокой теплотой парообразования, поэтому их испарение влечёт уменьшение температуры в предпламенной зоне крекинга, замедляя химические процессы образования зародышей сажистых частиц. Возникает водородное торможение радикально-цепных процессов высокотемпературного крекинга, известное как эффект Лангмюра. Водород как химический реагент способен активно воздействовать на процессы результирующего сажевыделения. В высокотемпературной фазе водород катализирует процесс ускоренного выгорания частиц сажи. При распаде молекул спирта система насыщается не только водородными радикалами, но и радикалами гидроксидной группы • OH, которые замедляют процессы дегидрогенизации и способствуют обрыву цепей на стадиях образования радикалов зародышей частиц сажи. Очевидно, что наличие атома кислорода в молекуле этих спиртов сдерживает рост скорости цепной реакции образования зародышей сажи [19].

Установлено, что эти спирты способствуют подавлению образования сажи в перемешанных пламенах этилена. Добавление биоэтанола или биометанола снижает концентрацию основных предшественников полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) – бензола и пропаргилового радикала. Из анализа основных путей реакций, ведущих к образованию бензола, можно сделать вывод, что механизм подавления сажи главным образом состоит в снижении доли углерода, идущего на формирование сажевых зародышей [20].

Не менее перспективным для автолюбителей может быть топливо растительного происхождения из семян масличных культур (подсолнечник, соя, рапс, рыжик, горчица и т. д.). Выбор растительного масла в качестве сырья для получения биотоплива определяется факторами возделывания масличных культур, прежде всего природно-климатическими условиями, высокой урожайностью, многофункциональностью использования продуктов переработки. Растительные масла имеют близкие к дизельному топливу теплоту сгорания, цетановое и коксовое числа, зольность и содержание серы, однако заметно отличаются по вязкости и плотности. Для получения растительных масел и производства биотоплива в Европе служит рапс, в США – соя, в Канаде – канола, в Индонезии и Филиппинах – пальмовое и кокосовое масло, в Индии – ятрофа, в Африке – соя и ятрофа, в Бразилии – касторовое масло. Преимущественной культурой для получения биотоплива в условиях России является подсолнечник и озимый рапс [21].

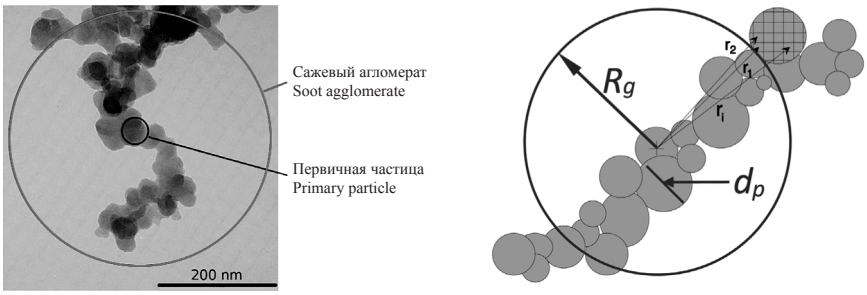
Рапсовое масло – маслянистая жидкость бурого цвета, приобретающая после рафинирования светло-жёлтый цвет. Оно представляет собой смесь моно-, ди- и триацилглицеринов, которые содержат в своём составе молекулы различных жирных кислот. Главное преимущество рапсового масла по сравнению с нефтяным топливом – его практически полная биоразлагаемость. Кроме того, рапсовое масло не содержит ПАУ, являющихся канцерогенами, но в его молекулах присутствуют атомы кислорода, что делает рапсовое масло потенциально более экологически безопасным топливом, а наличие большого количества атомов кислорода в молекулах жирных кислот способствует более полному сгоранию рапсового масла и отсутствию дымящего выхлопа автомобиля [22].

Разумеется, чтобы заправить свой автомобиль тем или иным биотопливом, необходимо пройти длительный процесс исследований, а если мы говорим о снижении дымности ВГ, то решение этой проблемы невозможно без изучения процессов сажеобразования в автомобильном двигателе.

Образование сажевых частиц

Для глубокого понимания основных механизмов образования и процессов роста сажевых частиц очень важны морфология и микроструктура их агрегатных состояний. На рисунке 2 представлены снимки агломератов частиц сажи, сделанных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, на которых видны более или менее разветвлённые агрегаты, и каждый агломерат состоит из десятков до сотен сферических или почти сферических первичных частиц [23].

Кроме того, большинство первичных частиц сажи частично перекрывается со своими соседними первичными частицами во время слияния зародышей. Для точного анализа микроструктуры агрегатных частиц необходимо определять размер первичных частиц d_p и фрактальную размерность d_f. Раз-



a b

Рис. 2. Сажевые агломераты: a – изображения отобранных первичных агломератов сажи; b – схема определения размера первичных частиц d_p
Fig. 2. Soot agglomerates: a – images of selected primary soot agglomerates; b – scheme for determining the size of primary d_p particles

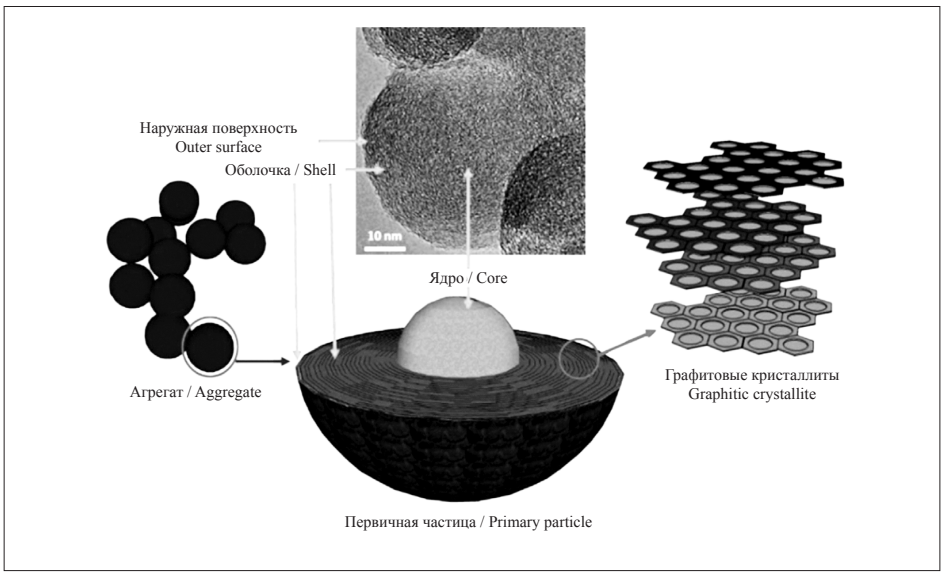
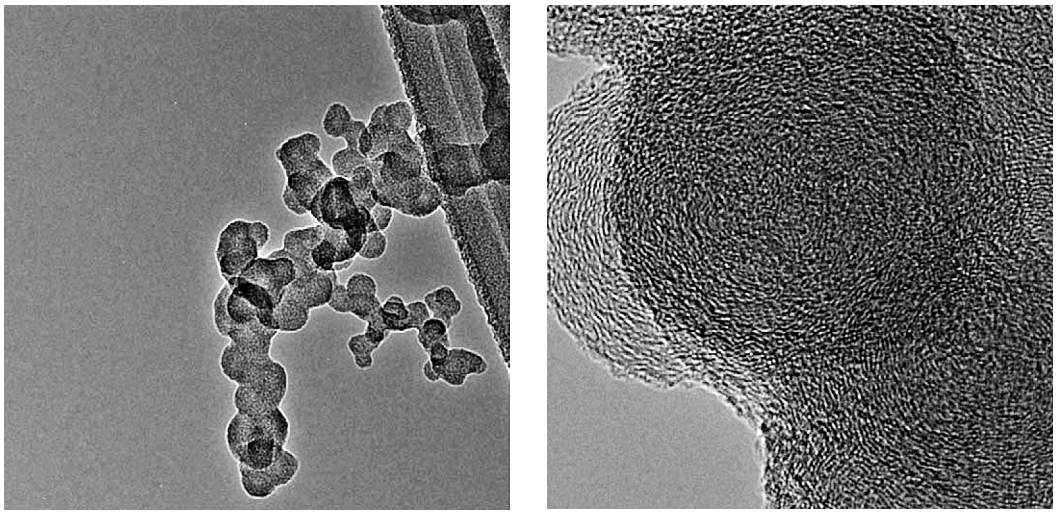


Рис. 3. Структура «оболочка-ядро» первичной частицы сажи при сгорании дизельного топлива
Fig. 3. The shell-core structure of the primary soot particle during the combustion of diesel fuel



a b

Рис. 4. Микрофотографии частиц сажи, полученные просвечивающей электронной микроскопией: a – агломерат; b – первичная частица
Fig. 4. Micrographs of soot particles obtained by transmission electron microscopy: a – agglomerate; b – primary particle

мер первичных частиц сажи d_p – это средний первичный диаметр, который может быть визуально определён с помощью просвечивающей электронной микроскопии изображений образцов. Фрактальная размерность является ключевым параметром при описании структуры агломератов и механизма их агломерации. Как правило, более высокое значение d_f представляет собой более сферическую структуру, в то время как меньшее значение d_f означает менее компактную и более разветвлённую [24].

На рисунке 3 в наномасштабе изображена частица сажи: внутреннее ядро и внешняя оболочка.

Внутреннее ядро содержит несколько мелких частиц с ядром, покрытых углеродными слоями турбостратной структуры, а внешняя оболочка состоит из графитовых кристаллитов, ориентированных параллельно внешней поверхности, что подтверждается результатами просвечивающей электронной микроскопии (рис. 4).

Таким образом, объединение (слипание) сажевых частиц до гранул является техническим моментом удаления агрегатной структуры, которая в противном случае определяет характер рассеяния первичных частиц. Текущая же методология размера первичных частиц сажи может быть определена с помощью просвечивающей электронной микроскопии, показывающей, что первичные частицы сажи представляют собой глобулы размером около 20 нм. Микрофотографии просвечивающей электронной микроскопии с большим увеличением также показывают ранее описанные луковичные частицы, включённые в первичную структуру. Они имеют средний размер около 5 нм, и их достаточно сложно различать на необработанных кривых рассеивания [25].

Существуют различные мнения о том, что является первичным зародышем частицы – ПАУ или ацетилен. Существование большого количества алифатических соединений на ранних стадиях образования (в ядре частицы) подтверждает в большей степени ацетиленовую теорию, в которой ацетилен активно участвует в реакциях зарождения частицы и её поверхностного роста.

Снижение дымности автомобилей

На рисунках 5 и 6 представлены в сравнении результаты экспериментальных и теоретических исследований дымности ВГ дизеля, работающего на биоэтаноле с запальной порцией рапсового масла. На всём диапазоне значений среднего эффективного давления p_e (рис. 5) цикловая подача рапсового масла была установлена равной 13 мг/цикл (20%

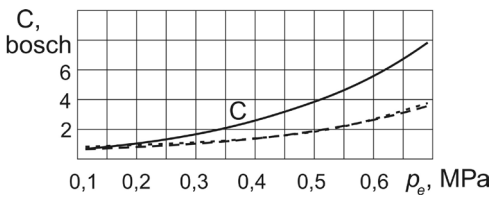


Рис. 5. Изменение дымности ВГ дизеля от нагрузки (p_e) [26]:
——— – дизельное топливо; — — — – биоэтанол и рапсовое масло (теоретические исследования);
- - - - - - – биоэтанол и рапсовое масло (экспериментальные исследования)

Fig. 5. Change in the smoke content of diesel EG from the load (p_e) [26]:
——— – diesel fuel; — — — – bioethanol and rapeseed oil (theoretical studies);
- - - - - - – bioethanol and rapeseed oil (experimental studies)

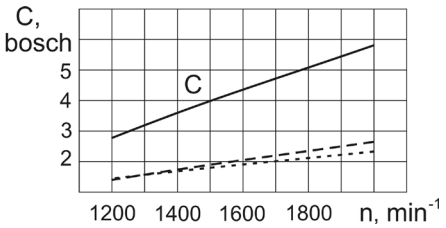


Рис. 6. Изменение дымности ВГ дизеля от частоты вращения коленчатого вала двигателя (n) [27]:
——— – дизельное топливо; — — — – биоэтанол и рапсовое масло (теоретические исследования);
- - - - - - – биоэтанол и рапсовое масло (экспериментальные исследования)

Fig. 6. Change in the smoke content of diesel EG from the engine crankshaft speed (n) [27]:
——— – diesel fuel; — — — – bioethanol and rapeseed oil (theoretical studies);
- - - - - - – bioethanol and rapeseed oil (experimental studies)

на номинальном режиме), а увеличение нагрузки осуществлялось изменением цикловой подачи биоэтанола. Теоретические результаты получены с помощью расчётного метода по ацетиленовой теории [26].

По результатам исследований работы дизеля на различных нагрузочных режимах можно сделать вывод, что с увеличением нагрузки происходит более эффективное снижение дымности ВГ. Так, на номинальном режиме (p_e = 0,588 МПа) это снижение составляет 3,8 раза.

Анализируя дымность ВГ дизеля при работе на биоэтаноле и рапсовом масле на различных скоростных режимах (рис. 6), следует отметить уменьшение сажесодержания в 3,2–3,8 раза.

Таким образом, применение биоэтанола и рапсового масла доказывает надёжное снижение дымности ВГ на всех нагрузочных и скоростных режимах работы при сохранении эффективных показателей двигателя.

На рисунке 7 представлены в сравнении результаты экспериментальных исследований других токсичных компонентов ВГ дизеля, работающего на биоэтаноле с запальной порцией рапсового масла [27–29].

На всём диапазоне скоростей применение биоэтанола и рапсового масла приводит к снижению концентрации оксидов азота NO_x, суммарных углеводородов C_xH_y, монооксида углерода CO при незначительном росте диоксида углерода CO_2.

На рисунке 8 изображены значения дымности ВГ дизеля при работе на биометаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от частоты вращения, анализ которой показывает, что перевод дизеля на указанное альтернативное топливо приводит к снижению сажесодержания более чем в 10 раз [30–32].

На рисунке 9 представлены нагрузочные характеристики дымности ВГ дизеля, работающего на биометаноле и метиловом эфире рапсового масла, анализ которых показывает, что в результате применения метанола и метилового эфира рапсового масла в качестве топлива на номинальном режиме происходит снижение выбросов оксидов азота на 47,4%,

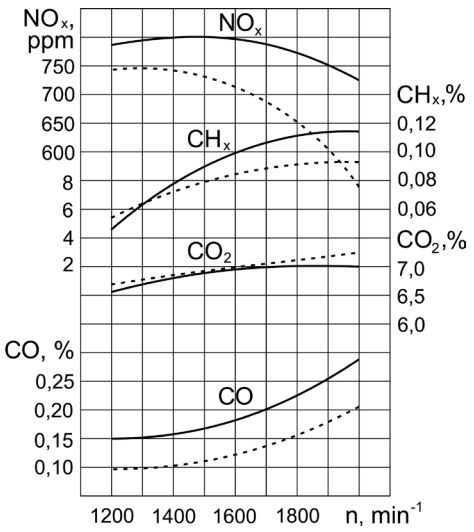


Рис. 7. Изменение токсичности ВГ дизеля от частоты вращения коленчатого вала двигателя [30]:
——— – дизельное топливо; - - - - - - – биоэтанол и рапсовое масло
Fig. 7. Change in the toxicity of diesel EG from the engine crankshaft speed [30]:
——— – diesel fuel; - - - - - - – bioethanol and rapeseed oil

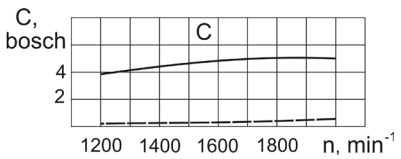


Рис. 8. Изменение дымности ВГ дизеля от частоты вращения коленчатого вала двигателя [33]:
——— – дизельное топливо; — — - – биометанол (88%) и метиловый эфир рапсового масла (12%)
Fig. 8. Change in the smoke content of diesel EG from the engine crankshaft speed (n) [33]:
——— – diesel fuel; — — - – biomethanol (88%) and rapeseed oil methyl ether (12%)

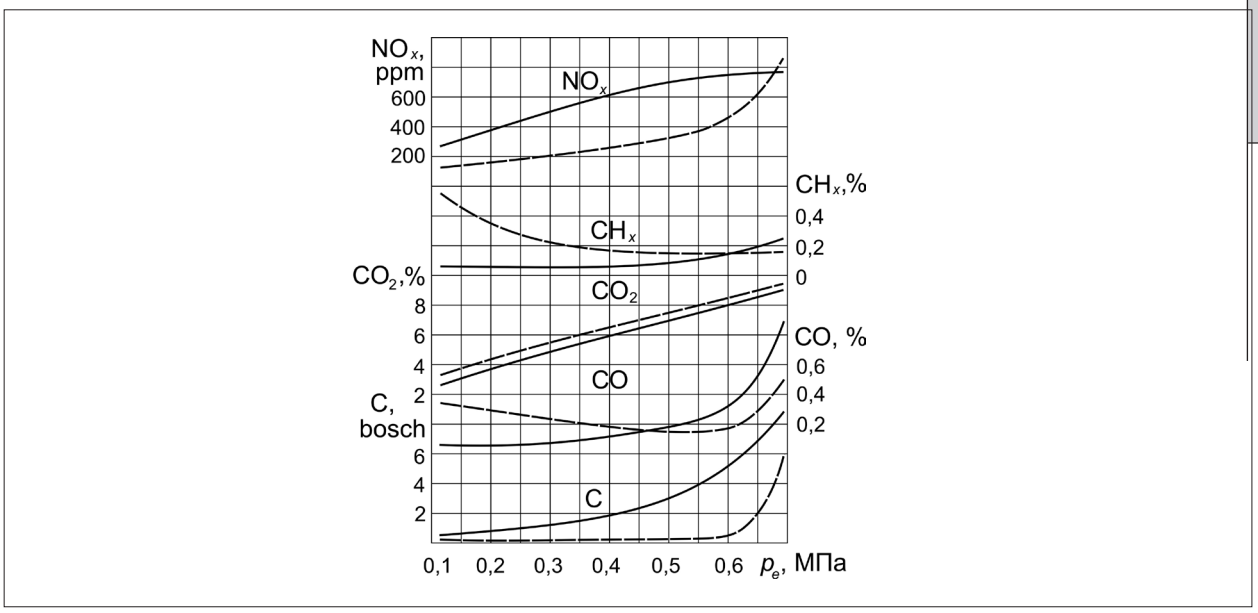


Рис. 9. Изменение токсичности ВГ дизеля от нагрузки (p_e) [33]: ——— – дизельное топливо; — — — – биометанол (88%) и метиловый эфир рапсового масла (12%)

Fig. 9. Change in the toxicity of diesel EG from the load (p_e) [33]: ——— – diesel fuel; — — — – biomethanol (88%) and rapeseed oil methyl ether (12%)

сажи – в 10,4 раза и оксида углерода – на 44,8% [33, 34].

Заключение

В результате проведённых исследований доказано эффективное снижение дымности ВГ двигателей путём применения таких биотоплив как биоэтанол, биометанол, рапсовое масло, метиловый эфир рапсового масла. Кроме снижения дымности ВГ происходит уменьшение практически всего спектра токсичных компонентов при сохранении мощностных показателей работы двигателя.

Применение указанных биотоплив позволяет полностью (на 100%) заместить нефтяное моторное топливо альтернативным, что является безусловным преимуществом данных двигателей перед своими «коллегами», работающими на нефтяных топливах. Переоборудованные на биотопливо «чистые» двигатели – это будущее, к которому по нашему мнению должен стремиться каждый автолюбитель.

References

1. Ishak M.H.H., Ismail F., Mat S.C., Abdullah M.Z., Abdul Aziz M.S., Idroas M.Y. Numerical analysis of nozzle flow and spray characteristics from different nozzles using diesel and biofuel blends // Energies. 2019. V. 12. No. 2. Article No. 281. doi: 10.3390/en12020281

2. Lif A., Holmberg K. Water-in-diesel emulsions and related systems // Advances in Colloid and Interface Science. 2006. V. 123. No. 126. P. 231–239. doi: 10.1016/j.cis.2006.05.004

3. Marchuk A., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as ecofriendly biofuel // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 80–86 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-080-086

4. Thakur A.K., Kaviti A.K., Singh R., Gehlot A. An overview of butanol as compression ignition engine fuel // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2020. V. 21. No. 4. P. 333–354. doi: 10.1615/INTERJENERCLEANENV.2020033667

5. Algayyim S.J.M., Yusaf T., Wandel A.P., Hamawand I. Production and application of abe as a biofuel // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V. 82. P. 1195–1214. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.082

6. Shah P.R., Gaitonde U.N., Ganesh A. Influence of soy-lecithin as bio-additive with straight vegetable oil on ci engine characteristics // Renewable Energy. 2018. V. 115. P. 685–696. doi: 10.1016/j.renene.2017.09.013

7. Kuszewski H. Experimental investigation of the autoignition properties of ethanol–biodiesel fuel blends // Fuel. 2019. V. 235. P. 1301–1308. doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.146

8. Al-Esawi N., Qubeissi M.A., Kolodnytska R. The impact of biodiesel fuel on Ethanol/Diesel blends // Energies. 2019. V. 12. No. 9. Article No. 1804. doi: 10.3390/en12091804

9. Kumar A.N., Kishore P.S., Raju K.B. Engine parameter optimization of palm oil biodiesel as alternate fuel in CI engine // Environmental Science and Pollution Research. 2019. V. 26. No. 7. P. 6652–6676. doi: 10.1007/s11356-018-04084-z

10. Erdiwansyah, Mamat R., Sani M.S.M., Sudhakar K., Kadarohman A., Sardjono R.E. An overview of higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines // Energy Reports. 2019. V. 5. P. 467–479. doi: 10.1016/j.egyr.2019.04.009

11. Yesilyurt M.K. The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends // Renewable Energy. 2019. V. 132. P. 649–666. doi: 10.1016/j.renene.2018.08.024

12. Sinyavski V.V., Shatrov M.G., Dunin A.Y. Results of simulation and experimental research of automobile gas diesel engine // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2019. V. 7. No. 1. P. 281–286. doi: 10.21533/pen.v7i1.396

13. Sivakumar M., Ramesh kumar R., Syed Thasthagir M.H. Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine // Renewable Energy. 2018. V. 116. P. 518–526. doi: 10.1016/j.renene.2017.10.002

14. Zhang J., He L., Gong J. Effects of a nanoceria fuel additive on the physicochemical properties of diesel exhaust particles // Environmental Sciences: Processes and Impacts. 2016. V. 18. No. 10. P. 1333–1342. doi: 10.1039/c6em00337k

15. Chandra R., Kumar R. Fuel properties of some stable alcohol-diesel microemulsions for their use in compression ignition engines // Energy and Fuels. 2007. V. 21. No. 6. P. 3410–3414. doi: 10.1021/ef0701788

16. Sanli H., Canakci M., Alptekin E. Effects of waste-frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine // Fuel. 2015. V. 159. P. 179–187. doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.081

17. Wu D., Wand W., Pang Z., Cao S., Yan J. Experimental investigation of spray characteristics of diesel-metanol-water emulsion // Atomization and Sprays. 2015. V. 25. No. 8. P. 675–694. doi: 10.1615/AtomizSpr.2015011524

18. Aydin F., Ogut H. Effects of ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions // Renewable Energy. 2017. V. 103. P. 688–694. doi: 10.1016/j.renene.2016.10.083

19. Datta A., Mandal B.K. Impact of alcohol addition to diesel on the performance combustion and emissions of a compression ignition engine // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 98. P. 670–682. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.047

20. Titak W., Szwaja S., Lukacs K. Alcohol-diesel fuel combustion in the compression ignition engine // Fuel. 2015. V. 154. P. 196–206. doi: 10.1016/j.fuel.2015.03.071

21. Kurczyński D., Łagowski P. Performance indices of a common rail-system ci engine powered by diesel oil and biofuel blends // Journal of the Energy Institute. 2019. V. 92. No. 6. P. 1897–1913. doi: 10.1016/j.joei.2018.11.004

22. Asadi A., Mohammadi H., Khorand H., Zhang Y., Rui Z., Doranehgard M.H., Bozorg M.V. Combustion and emission characteristics of biomass derived biofuel, premixed in a diesel engine: a CFD study // Renewable Energy. 2019. V. 138. P. 79–89. doi: 10.1016/j.renene.2019.01.069

23. Popovicheva O., Persiantseva N., Timofeev M., Kireeva E., Engling G., Lin K.-T., Völk P., Hubert A., Wachtmeister G. Diesel/biofuel exhaust particles from modern internal combustion engines: microstructure, composition, and hygroscopicity // Fuel. 2015. V. 157. P. 232–239. doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.073

24. Kopeika A.K., Golovko V.V., Zolotko A.N., Raslavičius L., Lubarskii V.M. Influence of biofuel additions on the ignition delay of single diesel fuel drops // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. V. 88. No. 4. P. 948–957. doi: 10.1007/s10891-015-1269-4

25. Hoang A.T., Ölçer A.I., Nižetić S. Prospective review on the application of biofuel 2,5-dimethylfuran to diesel engine // Journal of the Energy Institute. 2021. V. 94. P. 360–386. doi: 10.1016/j.joei.2020.10.004

26. Hurtado B., Luna D., Bautista F.M., Luna C., Calero J., Romero A.A., Estevez R., Posadillo A., Hidalgo J.M. Synthesis, performance and emission quality assessment of ecodiesel from castor oil in diesel/biofuel/alcohol triple blends in a diesel engine // Catalysts. 2019. V. 9. No. 1. Article No. 40. doi: 10.3390/catal9010040

27. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Alcohol biofuels for internal combustion engine // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 548. Article No. 062041. doi: 10.1088/1755-1315/548/6/062041

28. Popovicheva O.B., Kireeva E.D., Shonija N.K., Vojtisek-Lom M., Schwarz J. FTIR analysis of surface functionalities on particulate matter produced by off-road diesel engines operating on diesel and biofuel // Environmental Science and Pollution Research. 2015. V. 22. No. 6. P. 4534–4544. doi: 10.1007/s11356-014-3688-8

29. Del Río J.I., Pérez W., Cardeño F., Marín J., Rios L.A. Pre-hydrogenation stage as a strategy to improve the continuous production of a diesel-like biofuel from palm oil // Renewable Energy. 2021. V. 168. P. 505–515. doi: 10.1016/j.renene.2020.12.086

30. Likhanov V.A., Lopatin O.P., Yurlov A.S., Anfilatova N.S. Investigation of the effective performance of diesel engines running on methanol and rapeseed oil methyl ether // Journal of Physics: Conf. Series. 2021. V. 1889. Article No. 042067. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042067

31. Labeckas G., Slavinskas S., Kanapkiene I. Study of the effects of biofuel-oxygen of various origins on a CRDI diesel engine combustion and emissions // Energies. 2019. V. 12. No. 7. Article No. 1241. doi: 10.3390/en12071241

32. Lapuerta M., Villajos M., Agudelo J.R., Boehman A.L. Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines // Fuel Processing Technology. 2011. V. 92. No. 12. P. 2406–2411. doi: 10.1016/j.fuproc.2011.09.003

33. Lopatin O.P. Calculation of the process of nitrogen oxides formation during combustion of methanol in the engine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 919. Article No. 062011. doi: 10.1088/1757-899X/919/6/062011

34. Iojoiu E., Lauga V., Abboud J., Legros G., Bonnety J., Da Costa P., Schobing J., Brillard A., Leyssens G., Tschamber V., Anguita P., Vargas J.G., Retailleau L., Gil S., Giroir-Fendler A., Tarot M.L., Can F., Duprez D., Courtois X. Biofuel impact on diesel engine after-treatment: deactivation mechanisms and soot reactivity // Emission Control Science and Technology. 2018. V. 4. No. 1. P. 15–32. doi: 10.1007/s40825-017-0079-x

УДК 599.742.11:911.372.2(470.13) doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-237-243

Некоторые аспекты проблемы проникновения волка (*Canis lupus* L.) в населённые пункты Республики Коми

© 2021. А. Н. Королев, м. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: korolev@ib.komisc.ru

В 2014–2020 гг. в Республике Коми на фоне роста численности волка существенно возросла частота его проникновения в населённые пункты. Хищник отмечен как минимум в 106 населённых пунктах (14,7% от числа населённых пунктов региона с ненулевым населением) 18 (из 20) районов, как в деревнях, так и в городах, включая столицу региона – г. Сыктывкар. Чаще всего (в 45% случаев) волк заходит в населённые пункты с числом жителей от 100 до 1000. Главное негативное следствие проникновения – гибель домашних животных, в основном собак. 70,4% нападений на собак происходит с октября по январь, нападения не отмечаются лишь в апреле и мае. Оценочный размер максимальной годовой гибели собак от хищничества волка в сельской местности Республики Коми – порядка 400–500 особей или 1,5–2% от совокупного размера группировки «сельских» собак региона.

Ключевые слова: волк, *Canis lupus* L., Республика Коми, населённые пункты, гибель домашних животных.

Some aspects of the problem of the wolf's (*Canis lupus* L.) penetration in the settlements of the Komi Republic

© 2021. A. N. Korolev ORCID: 0000-0001-5735-5951,
Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Science,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: korolev@ib.komisc.ru

We described the problem of wolves penetrations into the settlements of the Komi Republic in 2014–2020 based on the analysis of electronic media messages (n = 271). The frequency of its penetration into human settlement increased significantly on the background of growing of the wolf's population. The predator was recorded in at least 106 settlements (14.7% of the number of settlements in the region with a non-zero population) and in 18 (out of 20) districts. It was recorded in villages as well as in cities, including the capital of the region – Syktyvkar. Approximately half (48.2%) of these settlements are located in four southern Komi Republic districts: Ust-Vymsky, Sysolsky, Syktyvdinsky and Kortkerossky. Settlements with the predator occurrences differed in population size from settlements without the predator occurrences. The median population size of the first settlements group (482 citizens, confidence interval CI = 93–3367, n = 106) was significantly higher (Mann-Whitney U-test, Z = -8.80, $p < 0.001$) than in second group (92 citizens, CI = 5–750, n = 614). The main negative consequences of the wolves invasions was its depredation on domestic animals (cows, calves, goats, sheep, cats and dogs). The main object of the wolves predation in settlements are dogs. Most of the attacks on dogs (70.4%) occur from October to January. The attacks was not recorded in April and May only. The number of the attacks on dogs varies greatly by region and year. The estimated size of the maximum annual death of dogs from wolf predation in rural areas of the Komi Republic is about 400–500 individuals or 1.5–2% of the total size of the ''rural'' dogs' population in the region (our estimation is 24.2 thousand individuals). In some areas, the value of the annual death of dogs due to the wolf's attacks reaches many tens (up to hundreds) of individuals.

Keywords: wolf, *Canis lupus* L., Komi Republic, settlements, death of domestic animals.

В последние годы в населённых пунктах (н. п.) Республики Коми (РК) отмечается устойчивый рост частоты встреч крупных хищных млекопитающих [1]. В местных средствах массовой информации (СМИ) регулярно появляются сообщения о заходах, как в деревни, так и в города волка (*Canis lupus* L., 1758), бурого медведя (*Ursus arctos* L., 1758), рыси (*Lynx lynx* L., 1758), что вызывает обоснованные опасения граждан за своё здоровье и жизнь, состояние своего имущества. На этом фоне Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды РК (Минприроды РК) в 2014–2020 гг. неоднократно проводило

мероприятия по регуляции численности волка и бурого медведя, но их эффективность, по крайней мере относительно волка (во многом из-за отсутствия материальной стимуляции охотников), была низка. Число обращений граждан в органы внутренних дел по поводу захода хищников в н. п. неуклонно растёт: в 2016 г. таких обращений было 13, 2017 г. – 31, 2018 г. – 41 [1], в 2019 г. – 96 [2]. Апогеем сложившейся ситуации стала гибель 04.08.2019 г., предположительно из-за нападения волка, 14-летней девочки в п. Ёдва Удорского района [3]. В итоге вопрос борьбы с хищниками в н. п. вышел на уровень правительства региона. Результатом работы различных ведомств стало постановление Правительства РК от 13.11.2019 г. № 545 [4], утвердившее денежное вознаграждение в размере 20 тыс. руб. за добычу одной особи волка и бурого медведя независимо от пола и возраста. Кроме того, приказом Минприроды РК от 20.01.2020 г. № 71 утверждён годовой объём добычи волка в рамках регуляции численности вида (322 особи) [5], превышающий все ранее утверждённые объёмы за 2014–2019 гг. в целом.

Настоящее исследование посвящено волку, так как из трёх вышеназванных видов хищников именно волк вызывает наибольшую негативную реакцию в обществе в случае его проникновения в среду обитания человека. Этот вид, в отличие от более крупного и более многочисленного [6] бурого медведя, активен в течение всего года, и в его рационе преобладают корма животного происхождения. Основная цель проникновения волка в н. п. – охота на домашних животных. Существенное обострение проблемы волка в н. п. связано со значительным ростом численности вида (рис. 1), что требует принятия мер, препятствующих усугублению сложившейся ситуации. В связи с этим необходимы сведения, позволяющие оценить масштаб проникновения хищника в н. п. региона. Цель работы – охарактеризовать проблему проникновения волка в н. п. РК в 2014–2020 гг. (период интенсивного роста численности вида).

Материал и методы исследования

Учёт числа случаев проникновения хищников в н. п. РК не ведётся. Поэтому базой для работы послужили сообщения о заходах волка в н. п., опубликованные в региональных электронных СМИ (информационные агентства «БНК» (https://www.bnkomi.ru/), «Комиинформ» (https://komiinform.ru), «КомиОнлайн» (https://komionline.ru), газеты «Комсомольская правда» (https://www.komi.kp.ru), «Про город Сыктывкар» (https://pg11.ru), «Про город Ухта» (https://progoroduhta.

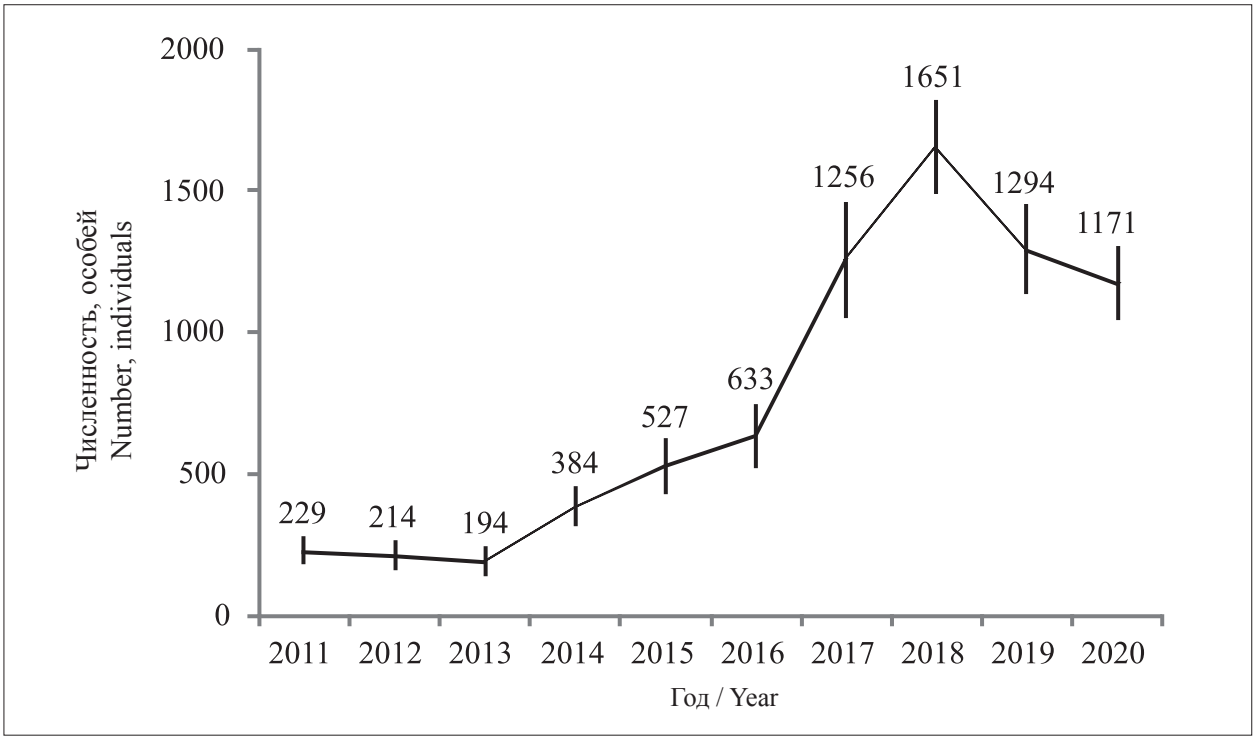


Рис. 1. Динамика численности волка в Республике Коми
Fig. 1. The wolf's population dynamics in the Komi Republic

ru), «Республика» (http://respublika11.ru), «Трибуна» (http://www.tribuna.nad.ru) и ряда других) с 01.08.2014 г. по 20.03.2020 г. Поиск сообщений вели в поисковой системе «Яндекс». В строку поиска вводили сочетание слов «волк_Ижемский (Усть-Цилемский, г. Воркута (как «Воркутинский»), г. Инта (как «Интинский») и так далее для всех районов) _ район», после чего отбирали интересующие нас сообщения на первых 10 страницах результатов поискового запроса. Кроме того, анализировали ссылки, приведённые в отобранных сообщениях. Общее число накопленных таким образом первичных сообщений равно 433, из которых после дальнейшего анализа 271 было принято к обработке. Из сообщений извлекали следующие данные: название н. п., в который зашёл волк (или появился на его окраине), дата захода, его результат (попытка нападения на домашнее животное, его ранение или смерть), число погибших животных, сведения обобщающего характера. Данные анализировали по сезонам (с сезона 2014/15 гг. по сезон 2019/20 гг.) с 01.08 по 31.07 (для сезона 2019/20 гг. по 20.03). Собранные таким образом сведения далеко не полные и несут в себе элемент субъективизма, а зачастую и преувеличения, тем не менее, они позволяют очертить контуры проблемы и выявить некоторые закономерности в картине проникновения волка в н. п.

Сведения о н. п. РК приведены по состоянию на 2010 г. [7]. За размер н. п. принято число его жителей. Для обозначения н. п., в которых отмечены (не отмечены) заходы волка, использована фраза «населённые пункты с волком (без волка)». Материалы по численности хищника получены в Управлении охраны и использования животного мира и охотничьих ресурсов Минприроды РК.

В качестве меры центральной тенденции использовали медиану, для сопоставления данных – *U* критерий Манна-Уитни и критерий χ^2 [8]. В работе принят 5%-ный уровень статистической значимости. Статистическую обработку числового материала и визуализацию её результатов проводили с помощью программ PAST 3.18 [9] и Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и обсуждение

Размещение населённых пунктов с волком. В 2014–2020 гг. заходы волка отмечались как минимум в 106 н. п. (14,7% от числа н. п. региона с ненулевым населением) 18 (из 20) районов. Примерно половина (48,2%) из указанного числа н. п. расположена в четырёх южных районах: Усть-Вымском (15 н. п.), Сысольском (13), Сыктывдинском (12) и Корткеросском (11). В целом волк проникает в н. п. преимущественно юго-западной части республики. В странах Северной Европы (Норвегии, Швеции, Финляндии), в сходных природно-климатических и ландшафтных условиях, но при иной системе природопользования, волки в большинстве своём избегают проникать в н. п. [10, 11]. В определённой мере это явление проявляется лишь в Финляндии [10].

Размер населённых пунктов с волком. Волк заходит в н. п. с населением от восьми до 178,8 тыс. человек (чел.). Чаще всего (в 45% случаев) хищник отмечается в н. п. с числом жителей от 100 до 1000 чел. (рис. 2). Распределение н. п. с волком по размеру значимо отличается ($\chi^2 = 99{,}16$, $df = 4$, $p < 0{,}001$) от такового н. п. без волка (при расчёте интервалы 10001–100000 и 100001–1000000 жителей (рис. 2) были объединены). Средний размер н. п. с волком (482 чел., ДИ (доверительный интервал) = 93–3367) значимо выше (*U* критерий, $Z = -8{,}80$, $p < 0{,}001$), чем н. п. без волка (92 чел., ДИ = 5–750, $n = 614$). Однозначно трактовать обнаруженную разницу нельзя. Она может быть вызвана как особенностями размещения волка (его тяготением к н. п. определённого размера, который определяет сложность пространственной архитектуры и особенности функционирования н. п., доступность его территории, наличие кормовых объектов), так и особенностями анализируемого материала (отсутствием сведений из малых («умирающих») и удалённых н. п.).

Сезонность проникновения волка в населённые пункты. В качестве показателя сезонности (внутригодовой) проникновения волка в н. п. использовали число нападений волка на собак (рис. 3). Установлено, что нападения начинаются в июне и длятся до марта включительно. 70,4% нападений фиксируется с октября по январь. Нападения не отмечаются лишь в мае и апреле (или они настолько редки, что не фиксируются СМИ), что, очевидно, связано с подготовкой животных к сезону размножения (в это время скрытность животных существенно возрастает). Не совсем понятно снижение числа нападений в декабре, возможно, оно связано с особенностями собранного материала. В Финляндии заходы волка в н. п. также носят сезонный характер, в летний период о нападениях хищника на собак здесь не сообщается [12].

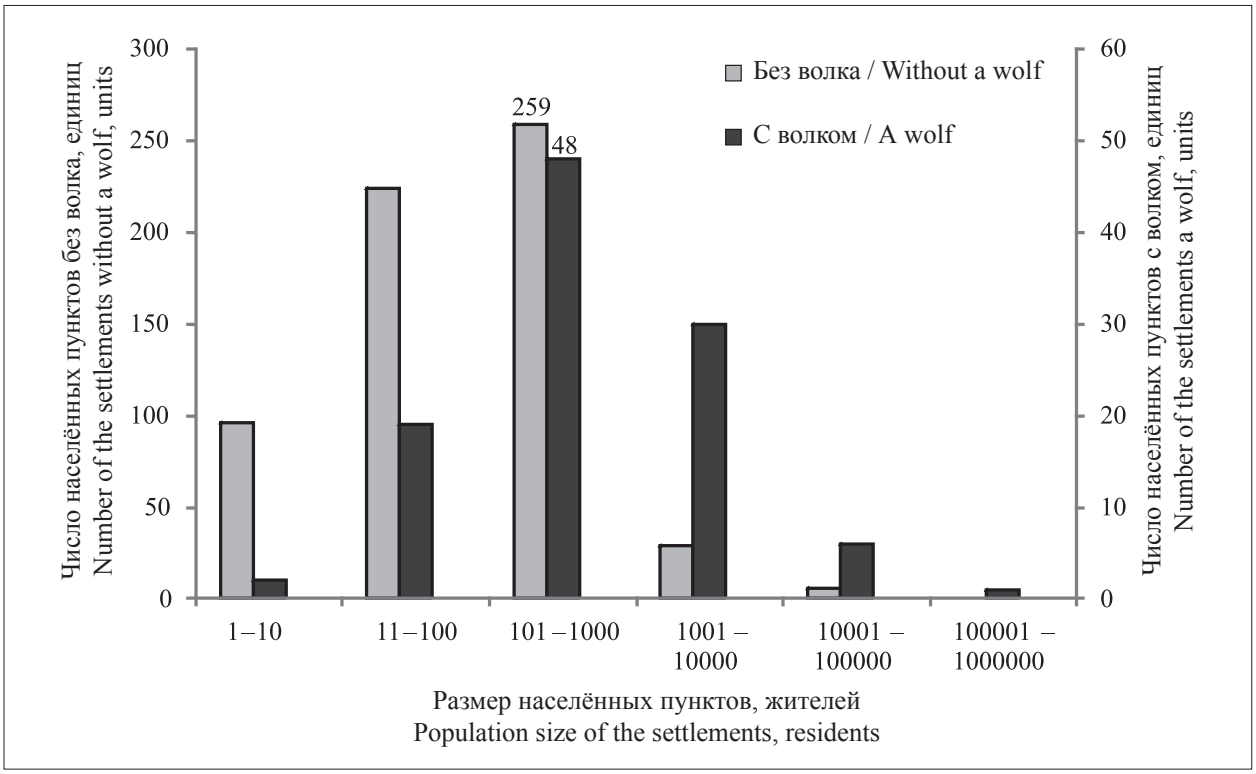


Рис. 2. Распределение населённых пунктов Республики Коми (с волком и без волка) по размеру
Fig. 2. Distribution of Komi Republic settlements (with a wolf presence and without it) by population size

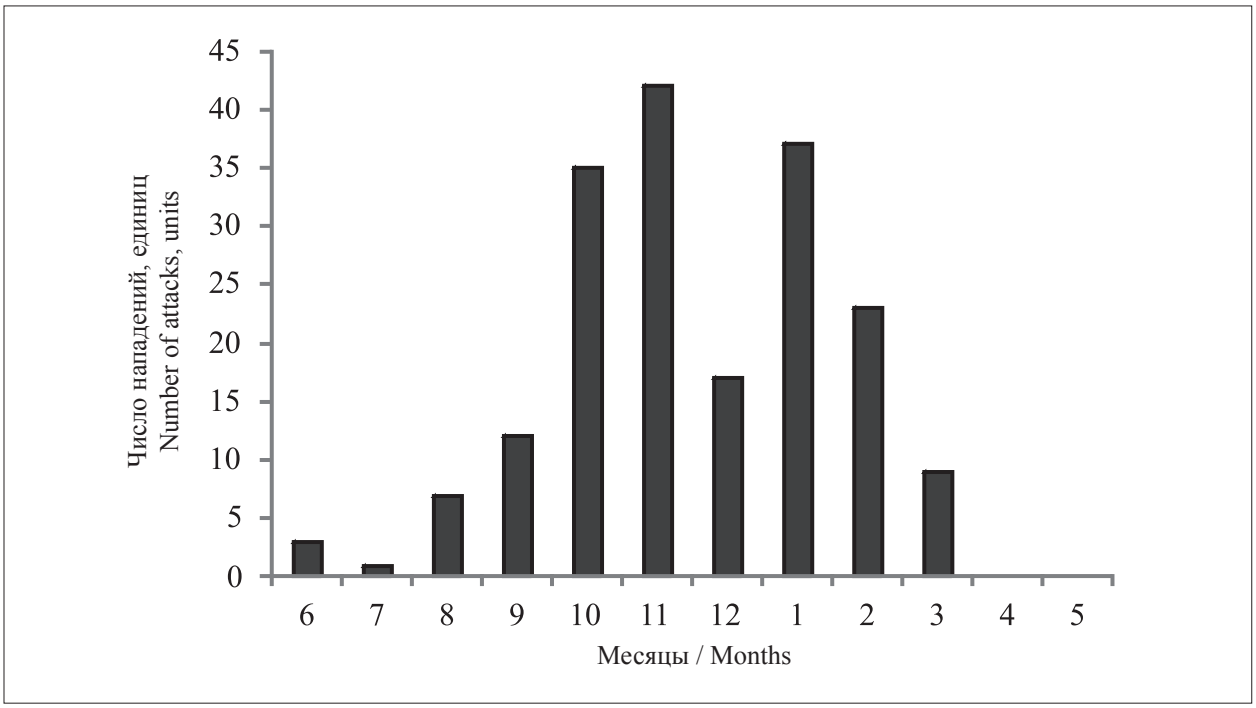


Рис. 3. Встречаемость (число нападений на собак) волка в населённых пунктах Республики Коми по месяцам (объединённые данные за 2015–2020 гг.)
Fig. 3. The number of encounters (the number of attacks on dogs) of a wolf in the settlements of the Komi Republic by months (combined data for 2015–2020)

Таблица / Table

Распределение нападений волков на собак и минимально возможные объёмы хищничества волков в отношении собак (особей) в Республике Коми в 2014–2020 гг.
Distribution of wolf attacks on dogs and minimal possible number of dogs killed by wolves (individuals) in the Komi Republic in 2014–2020

Районы / Districts		2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	Объём хищничества Killed dogs
Северные Northern	г. Воркута / Vorkuta	–	–	–	–	–	–	0
	Ижемский / Izhemsky	–	–	+	12	12	–	24
	г. Инта / Inta	–	–	–	30	–	–	30
	г. Печора / Pechora	–	–	–	1	–	–	1
	г. Усинск / Usinsk	–	–	–	–	–	–	0
	Усть-Цилемский / Ust-Tsilemsky	–	1	–	–	2	–	3
Центральные Central	г. Вуктыл / Vuktyl	–	–	–	–	–	–	0
	Княжпогостский / Knyazhpogostsky	–	–	15	6	13	6	40
	г. Сосногорск / Sosnogorsk	–	–	2	13	–	–	15
	Троицко-Печорский Troitsko-Pechorsky	–	–	–	1	–	10	11
	Удорский / Udorsky	2	–	–	20	1	1	24
	г. Ухта / Ukhta	–	–	–	34	16	–	50
Южные Southern	Койгородский / Koigorodsky	1	21	3	3	–	7	35
	Корткеросский / Kortkerossky	1	23	7	–	6	9	46
	Прилузский / Priluzsky	22	–	8	15	–	2	47
	Сыктывдинский / Syktyvdinsky	–	4	1	8	57	34	104
	г. Сыктывкар / Syktyvkar	–	1	6	2	7	6	22
	Сысольский / Sysolsky	13	–	–	62	3	4	82
	Усть-Вымский / Ust-Vymsky	–	37	16	6	11	–	70
	Усть-Куломский / Ust-Kulomsky	–	–	–	–	–	–	0
Объём добычи / Killed dogs		39	87	58	213	128	79	604

Примечание: прочерк означает отсутствие сведений о нападениях, «+» – нападения были, но число погибших собак неизвестно.

Note: The dash means absence of the information about attacks, "+" – there were attacks, but the number of dead dogs is unknown.

Домашние животные – жертвы волка. В 2014–2020 гг. жертвами волка стали три коровы (добыча указана в одном районе), четыре телёнка (в трёх районах), 12 коз (в трёх районах), 18 овец (в одном районе), несколько десятков кошек (в трёх районах) и порядка 600 собак (в 16 районах) (табл. 1). Список видов жертв следует признать достаточно полным. В то же время объёмы добычи, и прежде всего собак, требуют уточнения. Нападения на мелкий и крупный рогатый скот отмечаются в бесснежный период года (август – октябрь, пора выпаса и уличного содержания), когда заходы волка в н. п. редки. Нападения на кошек сравнительно малочисленны, так как они содержатся исключительно в домах и доступны хищникам лишь во время выгула. Собаки же в основном (по крайней мере, в сельской местности и в частном секторе на окраинах городов) круглогодично содержатся на улице, как свободно, так и на привязи или в вольерах. Поэтому именно они – главный объект нападения.

Мы попытались оценить размер гибели собак в РК. На основании данных СМИ были рассчитаны минимально возможные объёмы хищничества волков в отношении собак и в регионе по сезонам (табл.). Наши данные неполны, реальные объёмы хищничества должны быть выше. Об этом говорят сведения о фактических объёмах хищничества в отдельных н. п. региона (данные такого рода не использованы при составлении таблицы, так как они носят обобщающий характер и не могут быть отнесены к тому или иному сезону). Так, в течение 2017 г. в с. Летка Прилузского района от волков погибло 38 собак (или 81% от рассчитанного нами

урона за весь рассматриваемый период), а в с. Пажга (и его окрестностях) Сыктывдинского района – около сотни (94%). Ясно, что разница в оценках увеличивается с ростом численности хищника (в годы высокой численности волка на множественные для региона, но единичные для той или иной местности нападения просто не обращают внимания). По нашему мнению, в периоды максимальной хищнической активности волка минимальные оценки хищничества в отношении собак должны быть, как минимум, удвоены. Исходя из этого, размер реальной добычи волка в сезон 2017/18 гг. может составлять порядка 400–500 особей. В Финляндии в результате нападений волка (при численности хищника в 220–240 особей) ежегодно гибнет порядка 40–60 собак, из них около половины на придомовых территориях [10].

Оценка воздействия волка на популяцию собак в сельской местности. Для выявления степени воздействия волка на популяцию собак в сельской местности РК (из подсчитанного минимально возможного суммарного (за 2014–2020 гг.) объёма хищничества волков в отношении собак в РК (табл. 1) лишь 15 собак (2,5%) были «добыты» в городах, остальные в сельской местности, включая посёлки городского типа) мы рассчитали вероятное число собак в сельской местности региона (какие-либо данные по этому вопросу нами не найдены). При этом исходили из следующих условий: 1) средняя численность сельского населения в регионе в 2014–2020 гг. – 187,1 тыс. чел. [13, 14], 2) число сельских семей (домохозяйств) – 78 тыс. (при среднем размере в 2,4 чел. [15]), 3) число сельских семей с собаками – 22,6 тыс. (при доле семей с собаками в среднем по России в 29% [16], разброс – 18–38% [17, 18]), 4) среднее число собак на семью – 1,07 (рассчитано, исходя из численности населения в России (РФ) на 01.01.2019 г. в 146,8 млн чел. [19], числа семей (домохозяйств) в РФ в 61,2 млн (при среднем размере в 2,4 чел. [20]), при доле семей с собаками в среднем по РФ в 29%, численности собак в РФ в 18,9 млн (разброс – 16,5–20 млн) [21]. При этих вводных данных расчётное число собак в сельской местности РК – 24,2 тыс. особей. При всей условности расчётов полученное значение достаточно точно характеризует численность «сельских» группировок собак, которая в последние годы, по нашим оценкам, составляет порядка 20–30 тыс. особей. Исходя из этого, максимальное годовое изъятие собак волками в сельской местности РК (на примере сезона 2017/18 гг.) можно оценить в 1,5–2,0% от совокупного размера сельских группировок собак в регионе.

Заключение

Проникновение волка в н. п. до сих пор является большой проблемой для РК. В периоды высокой численности хищник регулярно посещает не только деревни и сёла, но и города, нанося ощутимый урон поголовью домашних животных, в первую очередь, собак. Размер гибели собак сильно колеблется по годам и районам, в отдельные «особо тяжёлые» годы он может достигать значений в сотни особей, что вызывает обоснованное возмущение граждан. Решение этой проблемы заключается в жёсткой регуляции численности хищника, что возможно лишь при надлежащем общегосударственном подходе (признании волка «вредным» видом, разрешении круглогодичной охоты на него (лицам, чья деятельность профессионально связана с охотой и охотничьим хозяйством), введении системы премирования на федеральном уровне, разрешении использовать петли и возврата к (ограниченному) использованию ядов. Предлагаем признать уничтожение хищников (кроме охраняемых видов) гражданами в н. п., в том числе с применением огнестрельного оружия, необходимой самообороной (с соответствующими изменениями всех затрагивающих этот вопрос нормативно-правовых актов).

Работа выполнена в рамках НИОКТР №АААА-А17-117112850235-2 «Распространение, систематика и пространственная организация фауны и населения наземных и водных животных таёжных и тундровых ландшафтов и экосистем европейского северо-востока России».

References

1. Boiling point: in Komi they are looking for ways to solve the problem of aggression of wolves [Internet resource] https://komiinform.ru/news/190448/ (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

2. Payments for the wolves and bears depredation was extended in Komi [Internet resource] https://komiinform.ru/news/192903/ (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

3. The detectives revealed the cause of death of a 14-year-old girl from Yodva village of Udorsky district of Komi Republic [Internet resource] https://komiinform.ru/news/186113/ (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

4. The Komi Republic Government Decree of 13.11.2019 No. 545 [Internet resource] http://docs.cntd.ru/document/561611672 (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

5. Order of the Ministry of natural resources and environmental protection of the Komi Republic of 01.20.2020 No. 71 [Internet resource] https://mpr.rkomi.ru/content/7090/skanirovaniye.pdf (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

6. Government report "The state of environment in the Komi Republic in 2018". Syktyvkar, 2019. 163 p. (in Russian).

7. Administrative-territorial and municipal structure of the Komi Republic (on August 1, 2016). Syktyvkar, 2016. 278 p. (in Russian).

8. Glantz S.A. Primer of Biostatistics. New York: McGraw Hill Inc., 1997. 473 p.

9. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4. No. 1. P. 1–9.

10. Kojola I., Hallikainen V., Mikkola K., Gurarie E., Heikkinen S., Kaartinen S., Nikula A., Nivala V. Wolf visitations close to human residences in Finland: The role of age, residence density, and time of day // Biological Conservation. 2016. V. 198. P. 9–14.

11. Carricondo-Sanchez D., Zimmermann B., Wabakken P., Eriksen A., Milleret C., Ordiz A., Sanz-Perez A., Wikenros C. Wolves at the door? Factors influencing the individual behavior of wolves in relation to anthropogenic features // Biological Conservation. 2020. V. 244. Article No. 108514. doi: 10.1016/j.biocon.2020.108514

12. Kojola I., Kuittinen J. Wolf attacks on dogs in Finland // Wildlife Society Bulletin. 2002. V. 30. No. 2. P. 498–501.

13. Statistical Yearbook of the Komi Republic. 2019. Syktyvkar, 2019. 347 p. (in Russian).

14. The resident population estimation for January 1, 2020 and average for 2019 [Internet resource] https://komi.gks.ru/population (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

15. Socio-demographic survey (population microcensus) 2015 of the Komi Republic (archive of summary tables) [Internet resource] https://komi.gks.ru/mpn2015 (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

16. Pet ownership. Global GfK survey [Internet resource] https://www.gfk.com/fileadmin/user_upload/website_content/Global_Study/Documents/Global-GfK-survey_Pet-Ownership_2016.pdf (Accessed: 13.04.2020).

17. Russians spend 36 billion rubles per month on pets [Internet resource] https://nafi.ru/analytics/rossiyane-tratyat-na-domashnikh-zhivotnykh-36-mlrd-rubley-v-mesyats/ (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

18. Russia is a country of cats [Internet resource] https://wciom.ru/index.php?id=236&uid=10030 (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

19. Showcase of statistical data (23110000100030200000 The number of resident population on January 1) [Internet resource] https://showdata.gks.ru/report/278928/ (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

20. Section IX. Households and Family Units Registered During the Micro-Census [Internet resource] https://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/demo/micro-perepis/finish/vol9.html (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

21. Investment in understanding, empathy, and fluffiness. How and why citizens have come to love spending on pets [Internet resource] https://www.kommersant.ru/doc/3947652 (Accessed: 21.04.2020) (in Russian).

К юбилею А. А. Широких

Александр Анатольевич Широких – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, профессор кафедры экологии Вятского государственного университета, авторитетный учёный в области микологии и микробиологии, автор нескольких сотен публикаций в различных научных изданиях. Тематика его исследований связана с актуальными проблемами сельского хозяйства, микробиологии, экологии и биотехнологии.

Наряду с научной деятельностью, Александр Анатольевич участвует в профессиональной подготовке молодых специалистов. Под его научным руководством выполнено и успешно защищено более 20 дипломных работ, 2 кандидатские и 7 магистерских диссертаций.

Александра Анатольевича мы знаем не только как талантливого учёного, прекрасного педагога, но и как человека эрудированного, с широким кругом интересов и огромным личным обаянием. Свой творческий потенциал А.А. Широких реализует через пропаганду бережного отношения к природе и распространение естественно-научных знаний в социальных сетях, охотно выступает с лекциями в различных аудиториях по приглашению государственных и общественных организаций, участвует во Всероссийских и международных конкурсах фотографов-натуралистов, сам организует фотовыставки, посвящённые разнообразию ликов дикой природы. Александр Анатольевич является членом Научно-технического совета Государственного природного заповедника «Нургуш», председателем фотоклуба «Диана» при Кировской областной научной библиотеке им. А.И. Герцена. Авторские работы А.А. Широких, посвящённые природе Кировской области, наряду с работами других вятских фотомастеров, вошли в коллективный фотоальбом «Кировская область» (2014), выпущенный в рамках Федерального издательского проекта «Моя страна».

Фотография – одно из главных увлечений Александра Анатольевича, начавшееся в студенческие годы. Занимаясь пешим и водным туризмом, бывая в суровых, но живописных уголках страны, он всегда фотодокументировал эти походы, постепенно становясь приверженцем пейзажного жанра. В дальнейшем его интересы сосредоточились на макрофотосъёмке. Этому во многом способствовали его профессиональные интересы. Уникальные авторские фотографии самых разнообразных объектов микромира используются для иллюстрации научных изданий, учебных и методических пособий, проведения лекций и мастер-классов. Обложку журнала «Теоретическая и прикладная экология», с момента его основания, неизменно украшают фотоработы А.А. Широких, создавая особый образ, отличающий журнал от других научных изданий.

Мы бесконечно благодарны Александру Анатольевичу за сотрудничество. Поздравляем его с юбилеем, желаем успеха в научном поиске, новых творческих удач и достижений, личного счастья и здоровья.

Редколлегия журнала
«Теоретическая и прикладная экология»

ФОТОГРАФИИ А. А. ШИРОКИХ

Макропейзаж с молодым мхом

Лептура зелёная (Lepturobosca virens L.)

Лишайник кладония Cladonia sp.

Коллембола (Collembola) на стемонитисе

Черноголовый чекан (Saxicola rubicola L.)

Наездник рогохвоста большого (Rhyssa persuasoria L.)

Жёлтая трясогуска (Motacilla flava L.)

Обыкновенный снегирь (Pyrrhula pyrrhula L.)

Горностай (Mustela erminea L.)

Индекс 82027

ISSN 1995-4301

9 771995 430004