



2020

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 1

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**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



**Институт биологии
Коми научного центра
Уральского отделения
Российской академии наук –
уникальное научное учреждение
Европейского
Северо-Востока России**



*Директор Института биологии
доктор биологических наук
Дёгтева Светлана Владимировна*

Институт биологии организован в 1962 г., он является самым крупным исследовательским учреждением в области оценки ресурсного потенциала экосистем Европейского Северо-Востока России, ориентирован на получение новых знаний. Высокую оценку международных экспертов получили работы в области оценки биологического разнообразия, растительности, животного населения, почвенного покрова, состояния и динамики развития экосистем европейского сектора Арктики, Субарктики и бореальной зоны, молекулярной радиобиологии и радиэкологии, генетики продолжительности жизни, экологической физиологии растений. Результаты опубликованы в зарубежных монографиях и высокорейтинговых научных журналах, включая журналы издательства Nature Publishing Group. Численность всех сотрудников Института составляет 321 человек, из них научных работников – 165, в том числе один член-корреспондент РАН, 24 доктора и 121 кандидат наук.

Институт выполняет значительный объём хозяйственных договоров по заказу крупнейших предприятий России и региона. Работы направлены на решение проблем развития системы особо охраняемых природных территорий, мониторинга состояния окружающей среды, ликвидации последствий экологических катастроф, оценки запасов биологических ресурсов, вопросов охраны редких и исчезающих биологических видов. В Институте разработаны и внедрены технологии оценки состояния экосистем и биологических ресурсов, природовосстановления. Поддерживаются 64 патента Российской Федерации на изобретения. Запатентованы способы определения фенольных соединений и радионуклидов, выделения и очистки биологически активных веществ, способы восстановления компонентов нарушенных экосистем, в том числе почв, загрязнённых нефтью.

В Институте успешно функционируют центры коллективного пользования сложным оборудованием – «Молекулярная биология» и «Хроматография», аккредитована экоаналитическая лаборатория и лабо-

ратория миграции радионуклидов и радиохимии. Экоаналитическая лаборатория входит в число европейских лидеров по качеству выполняемых работ, что подтверждается результатами независимых международных межлабораторных сравнительных испытаний (МСИ). Институт вышел на первые позиции в области количественного химического анализа среди 62 учреждений из 28 стран Европы. Получены свидетельства об аттестации 30 методик измерений.

Институт интегрирован в международное научное пространство, является участником крупного международного консорциума. Выполняет многочисленные международные проекты, в том числе поддержанные ПРООН/ГЭФ и 7-й Рамочной программой Европейской Комиссии. Сотрудники Института являются членами международных рабочих групп и комиссий, входят в состав редколлегий зарубежных научных журналов. Достижения Института по внедрению современных методов исследований отмечены организаторами международных исследовательских сетей (GBIF, система МСИ).

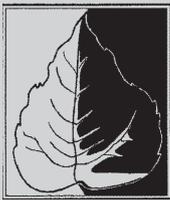
Результаты исследований нашли практическое применение при ликвидации последствий аварий на Чернобыльской АЭС (1986–1994 гг.) и Усинском нефтяном месторождении (1994–2004 гг.), востребованы крупными предприятиями (Лукойл, Газпром, СУАЛ, Монди СЛПК и др.).

В настоящее время Институт биологии является обособленным подразделением Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук».

25 февраля 2020 г. по итогам встречи трудового коллектива Института биологии и заседания конкурсной комиссии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН директором института была избрана доктор биологических наук Светлана Владимировна Дёгтева.

Коллектив редколлегий журнала «Теоретическая и прикладная экология» от всей души поздравляет Светлану Владимировну с избранием на должность директора ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН!

Адрес: 167982, Россия, Республика Коми,
г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
Тел./ факс: (8212) 24-01-63, 24-11-68; 24-52-13, 44-73-15
Электронная почта: directorat@ib.komisc.ru
Сайт: <http://ib.komisc.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 (№ 2048 по состоянию 04.03.2020).

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

Журнал издаётся с 2007 года.

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

Главный редактор Т.Я. Ашихмина, д.т.н., профессор, зав. лабораторией Вятского государственного университета, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН

Зам. главного редактора Л.И. Домрачева, д.б.н., профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии

Зам. главного редактора С.В. Дёгтева, д.б.н., директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН

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

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

Ответственный секретарь С.Г. Скугорова, к.б.н. доцент, научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН

Технические секретари:

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

Адрес редакции:

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

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Редакция не несёт ответственности за достоверность информации, содержащейся в рекламных объявлениях.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: серия ПИ № ФС77-74434 от 23 ноября 2018 г.

Подписные индексы 82027, 48482 в каталоге Агентства «Роспечать». Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39, тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. E-mail: info@periodicals.ru; <http://www.periodicals.ru>

Издательство: ООО «О-Краткое»
Адрес издательства: 610000, Кировская область,
г. Киров, Динамовский проезд, 4, оф. 101.

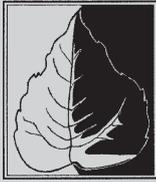
Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, фото на обложке – Александр Широких, перевод – Григорий Кантор, администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман, выпускающий редактор – Мария Зелаева.
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

© Оформление. Издательство «О-Краткое»
Дата выхода выпуска в свет: 27.03.2020.
Тираж 250 экз. Заказ № 0376. Цена свободная.

Типография: ООО «Кировская цифровая типография»
Адрес типографии: 610017, Кировская область,
г. Киров, ул. Молодой Гвардии, 57 а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, научный руководитель Президиума Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- Е.В. Дабах** к.б.н., старший научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- М.В. 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 Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- В.Л. Коваленко** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор Вятского государственного университета
- В.А. Коток** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- А.В. Кучин** д.х.н, член-корр. РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лаженцев** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета, иностранный член РАН (КНР)
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., проректор ВятГУ
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н, член-корр. РАН, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., директор Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., член-корр. 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. Юнглод** д.и.н., профессор Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 1, 2020

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, Vyatka State University, Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
Vice-Editor-in-Chief L.I. Domracheva,
Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agricultural Academy
Vice-Editor-in-Chief S.V. Degteva,
Doctor in Biology, Director of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
Vice-Editor-in-Chief I.G. Shirokikh,
Doctor in Biology, Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
Vice-Editor-in-Chief B.I. Kochurov,
Doctor in Geography, Professor, the leading researcher of the Institute of Geography RAS
Executive Secretary S.G. Skugoreva,
PhD in Biology, researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
Technical Secretaries:
T.I. Kut'yavina, PhD in Biology, senior researcher of Vyatka State University,
V.V. Rutman, engineer of Vyatka State University

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

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

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

Subscription index 82027, 48482
in the catalogue of Agency «Rospechat».

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

Publisher: the publishing house of «O-Kratkoe»
Publisher's Address: of. 101, 4 Dynamoskiy proezd,
Kirov region, Russia, Kirov, 610000
Tel. +7 (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru.
Designer – Tatiana Korshunova. Cover photo – Aleksandr Shirokikh.
Translation – Grigoriy Kantor. Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva
Director of the publishing house «O-Kratkoe» Evgeniy Drogov
© Publishing house «O-Kratkoe»

12+

Typography: «Kirov digital printing house»
Printing Address: 57 a Molodoy Gvardii St., Kirov,
Kirov region, Russia, 610017

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

- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, scientific director of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, the Chief Researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, senior researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Georg August University of Göttingen (Germany)
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, researcher of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.L. Kovalenko** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, the leading researcher, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyets** Doctor in Biology, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor of Vyatka State University
- V.A. Kotok** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, corresponding member of RAS, Professor, scientific director Institute of Chemistry of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, corresponding member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, corresponding member of RAS, Chief of the Laboratory of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of laboratory in Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Director of the Institute of Chemistry of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, corresponding member 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 the 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

- Т. К. Головки, М. А. Шелякин, Т. Н. Пыстина* Эколого-биологические и функциональные свойства лишайников таёжной зоны Европейского Северо-Востока России (обзор)6
- В. А. Сысуев, Л. И. Кедрова, Е. И. Уткина* Значение озимой ржи для сохранения природного агроэкологического баланса и здоровья человека (обзор) 14
- О. И. Белых, И. В. Тихонова, А. В. Кузьмин, Е. Г. Сороковикова, С. А. Потапов, А. В. Галкин, Г. А. Федорова* Токсинпродуцирующие цианобактерии в озере Байкал и водоёмах Байкальского региона (обзор) 21

СТАТЬИ

- Н. П. Неведров, Е. П. Проценко, И. П. Балабина, Б. И. Кочуров, Е. В. Куликова* Ресурсный подход к оценке загрязнения почв тяжёлыми металлами и изучению ёмкости геохимических барьеров на примере города Курска 28
- З. Б. Намсараев, Я. Э. Сергеева* Использование спектрофотометрии для изучения вспомогательных пигментов фотосинтезирующих микроорганизмов 35
- Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина* Определение трофического статуса водоёма и пространственного распределения водной растительности по интегральным показателям 42

- Л. А. Gaysina, A. I. Fazlutdinova, O. N. Mukhina, L. F. Akhmadeyeva, D. Yu. Rogozin, A. O. Bul'khin, N. V. Sukhanova, J. R. Johansen* Ecological features of cyanobacteria and algae communities of the littoral of the meromictic Shira Lake (Khakassia Republic, Russia) ... 47
- S. Varinova* Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution 51
- Л. Н. Тикучева* Комплексы цианопрокариот и водорослей в зоне влияния магистрального газопровода (бассейн реки Кара) 58
- Е. Л. Воробьевская, Н. Б. Седова, М. В. Слипечук, М. Н. Цымбал* Геоэкологические исследования снега и поверхностных вод в зимний период в центральной части Кольского полуострова 64
- Е. Л. Воденеева, А. Г. Охапкин, П. В. Кулизин, Н. А. Старцева, Е. М. Шарагина, О. О. Бондарев, Т. В. Лаврова* Состав и развитие цианобактерий Чебоксарского водохранилища и его притоков 71
- Р. Г. Фархутдинов, З. Р. Саитова, Б. Р. Кулуев, А. С. Григориади, В. В. Федяев, М. И. Гарипова, Е. И. Новоселова, А. А. Ямалева* Физиолого-биохимические и генетические параметры в популяциях лишайника *Physcia stellaris* Nyl. в зависимости от уровня загрязнения 77

- Г. Н. Табаленкова, О. В. Дымова, Т. К. Головки* Азот и азотсодержащие соединения в цианолишайниках рода *Peltigera* 84
- Т. А. Адамович, С. Г. Скугорева, Е. В. Товстик, Т. Я. Ашихмина* Изучение особенностей химического состава водных объектов заповедной территории для использования в качестве регионального фона 89

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ И
ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ И
АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

**ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ**

В. В. Елсаков, И. Г. Захожий, А. С. Шуйский Накопление тяжёлых металлов и мышьяка в талломах *Cladonia rangiferina* на Европейском Севере России 97

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

Т. К. Шешегова, Г. А. Баталова, Л. А. Беспалова, В. Я. Ковтуненко, В. В. Панченко, А. П. Калмыш Иммунологическая и селекционная ценность новых линий яровой тритикале 104

Д. А. Давыдов, Е. Н. Патова, С. С. Шалыгин, А. А. Вильнет, И. В. Новаковская Проблема скрытого разнообразия цианопрокариот арктических территорий 110

Е. Н. Патова, М. Д. Сивков, Н. Н. Гончарова, Т. П. Шубина Ассоциации азотфиксирующих цианобактерий со сфагновыми мхами в пойменном болоте средней тайги (Европейский Северо-Восток) 117

Е. Ю. Воякина, Я. В. Русских, Е. Н. Чернова, З. А. Жаковская Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России 124

Л. И. Домрачева, А. Л. Ковина, С. Ю. Огородникова, А. И. Коротких, А. В. Короткова, Е. А. Домнина Ростстимулирующая активность листоватых лишайников 130

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

Yu. P. Khranilov, A. V. Zakharov, V. L. Kovalenko, V. A. Kotok Electrochemical utilization of disperse copper-iron waste 136

АГРОЭКОЛОГИЯ

М. Д. Бакаева, Е. В. Кузина, Г. Ф. Рафикова, Л. Б. Высоцкая, Т. Н. Архипова, З. А. Ахтямова, С. П. Четвериков, О. Н. Логинов Применение продуцирующих ауксины бактерий при фиторемедиации загрязнённой нефтью почвы 144

Н. Е. Завьялова, И. Г. Широких, В. Р. Ямалтдинова Микробиологическое состояние дерновоподзолистой почвы Предуралья при длительном применении органических и минеральных удобрений 151

Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина, Н. Н. Богатырёва, Г. Я. Кантор Перспективы использования хвостов обогащения фосфоритов в качестве удобрений для органического земледелия 160

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

В. В. Афанасьев, Е. И. Игнатов Геоморфологические аспекты проблемы защиты населённых пунктов на берегах морей в высоких широтах 167

**THEORETICAL
PROBLEMS
OF ECOLOGY**

CONTENTS

REVIEWS

T. K. Golovko, M. A. Shelyakin, T. N. Pystina Ecological and biological, and functional traits of lichens in Taiga zone of European Northeast of Russia (review) 6

V. A. Sysuev, L. I. Kedrova, E. I. Utkina Importance of winter rye for maintaining natural agroecological balance and human health (review) 14

O. I. Belykh, I. V. Tikhonova, A. V. Kuzmin, E. G. Sorokovikova, S. A. Potapov, A. V. Galkin, G. A. Fedorova Toxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal and reservoirs of Baikal region (review) ...21

ARTICLES

N. P. Nevedrov, E. P. Protsenko, I. P. Balabina, B. I. Kochurov, E. V. Kulikova Resource approach to assessment of heavy metal pollution of soils and studying the capacity of geochemical barriers on the example of Kursk City 28

Z. B. Namsaraev, Ya. E. Sergeeva The use of spectrophotometry to study secondary pigments of photosynthetic microorganisms 35

**METHODOLOGY
AND RESEARCH
METHODS.
MODELS AND
FORECASTS**

**MONITORING
OF ANTHROPO-
GENICALLY
DISTURBED
AREAS**

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

**POPULATION
ECOLOGY**

**GREENING
OF PRODUCTION
AGROECOLOGY**

SOCIAL ECOLOGY

T. I. Kut'yavina, V. V. Rutman, T. Ya. Ashikhmina Determination of the trophic status of the water reservoir and spatial distribution of aquatic vegetation by integral indicators42

L. A. Gaysina, A. I. Fazlutdinova, O. N. Mukhina, L. F. Akhmadeyeva, D. Yu. Rogozin, A. O. Bul'khin, N. V. Sukhanova, J. R. Johansen Ecological features of cyanobacteria and algae communities of the littoral of the meromictic Lake Shira (Khakassia Republic, Russia)47

S. Barinova Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution51

L. N. Tikusheva Cyanoprokaryota and algae complexes in the impact zone of the main gas pipeline (the Kara River basin)58

E. L. Vorobyevskaya, N. B. Sedova, M. V. Slipenchuk, M. N. Cymbal Environmental situation in the central part of the Kola Peninsula64

E. L. Vodeneeva, A. G. Okhaphkin, P. V. Kulizin, N. A. Startseva, E. M. Sharagina, O. O. Bondarev, T. V. Lavrova Composition and development of cyanobacteria of the Cheboksary reservoir and its tributaries (Nizhny Novgorod region)71

R. G. Farkhutdinov, Z. R. Saitova, B. R. Kuluev, A. S. Grigoriadi, V. V. Fedyaev, M. I. Garipova, E. I. Novoselova, A. A. Yamaleeva Physiological, biochemical, and genetic parameters of the lichen *Physcia stellaris* Nyl. populations depending on the level of pollution .. 77

G. N. Tabalenskova, O. V. Dymova, T. K. Golovko Nitrogen and nitrogen-containing compounds in cyanolichens of *Peltigera* genus 84

T. A. Adamovich, S. G. Skugoreva, E. V. Tovstik, T. Ya. Ashikhmina Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background ...89

V. V. Elsakov, I. G. Zakhozhiy, A. S. Shuyskiy Accumulation of heavy metals and arsenic in *Cladonia rangiferina* in the European North of Russia97

T. K. Sheshhegova, G. A. Batalova, L. A. Bespalova, V. Ya. Kovtunenkov, V. V. Panchenko, A. P. Kalmysh Immunological and breeding value of new spring triticale lines. 104

D. A. Davydov, E. N. Patova, S. S. Shalygin, A. A. Vilnet, I. V. Novakovskaya The problem of Cyanobacteria cryptic speciation in the Arctic region 110

E. N. Patova, M. D. Sivkov, N. N. Goncharova, T. P. Shubina Associations between nitrogen-fixing cyanobacteria and sphagnum mosses in floodplain bogs of the middle taiga (European Northeast)117

E. Ju. Voyakina, Ia. V. Russkikh, E. N. Chernova, Z. A. Zhakovskaya Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest124

L. I. Domracheva, A. L. Kovina, S. Yu. Ogorodnikova, A. I. Korotkikh, A. V. Korotkova, E. A. Domnina Growth-stimulating activity of leafy lichens130

Yu. P. Khranilov, A. V. Zakharov, V. L. Kovalenko, V. A. Kotok Electrochemical utilization of disperse copper-iron waste136

M. D. Bakaeva, E. V. Kuzina, G. F. Rafikova, L. B. Vysotskaya, T. N. Arkhipova, Z. A. Ahtyamova, S. P. Chetverikov, O. N. Loginov Application of auxin producing bacteria in phytoremediation of oil-contaminated soil144

N. E. Zavyalova, I. G. Shirokikh, V. R. Yamaltdinova Microbiological status of the Pre-Urals sod-podzolic soil with longterm use of organic and mineral fertilizers151

N. V. Syrchina, T. Ya. Ashikhmina, N. N. Bogatyryova, G. Ya. Kantor Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming..... 160

V. V. Afanasiev, E. I. Ignatov Geomorphological aspects of protection of coast settlements in high latitudes167

Эколого-биологические и функциональные свойства лишайников таёжной зоны Европейского Северо-Востока России (обзор)

© 2020. Т. К. Головки, д. б. н., профессор, г. н. с.,
 М. А. Шелякин, к. б. н., н. с., Т. Н. Пыстина, к. б. н., с. н. с.,
 Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
 167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
 e-mail: shelyakin@ib.komisc.ru

Обобщены сведения о флоре, биологии, экологии и физиологии лишайников таёжной зоны Европейского Северо-Востока России. Приведены данные о видовом разнообразии, географических, экологических и функциональных особенностях лишайников бореальных лесов Республики Коми. На территории Республики Коми к настоящему времени выявлен 791 вид лишайников из 59 семейств. Основная часть их обитает в лесных экотопах. Во всех лесных формациях преобладают бореальные виды. Большинство видов приурочено к местообитаниям с достаточным и избыточным увлажнением. По отношению к субстрату преобладают эпифитные виды.

Особое внимание уделено вопросам изучения физиолого-биохимических свойств, устойчивости лишайников к воздействию природных и антропогенных факторов среды. Показано, что лишайники способны эффективно использовать ресурсы среды, и могут играть заметную роль в азотном цикле таёжных экосистем, где этот элемент является лимитирующим. Установлено, что лишайники таёжной зоны быстро восстанавливают функциональную активность после обезвоживания, воздействия низкими температурами, избыточной инсоляции и других природных факторов. Исследования эколого-биологических свойств лишайников открывают перспективы для более глубокого понимания функционирования экосистем таёжной зоны Европейского Северо-Востока России.

Ключевые слова: лишайники, видовое разнообразие, эколого-биологические свойства, функциональная активность, условия среды, таёжная зона, Республика Коми.

Ecological and biological, and functional traits of lichens in Taiga zone of European Northeast of Russia

© 2020. T. K. Golovko ORCID: 0000-0002-7993-9541,
 M. A. Shelyakin ORCID: 0000-0001-8537-6995, T. N. Pystina ORCID: 0000-0003-2215-4724,
 Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,
 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
 e-mail: shelyakin@ib.komisc.ru

The data on flora, biology, ecology and physiology of lichens of the European Northeast of Russia Taiga zone are summarized. The results of study of lichens diversity, and its geographic, environmental and functional peculiarities are discussed. Special attention is paid to the physiological and biochemical properties, and lichen resistance to natural and anthropogenic environmental factors.

Lichens flora of the Komi Republic taiga zone is characterized by high taxonomic diversity (791 species from 59 families and 184 genera). The most part of lichens habitats is in the forest ecotopes. Boreal species predominate. Lichens occupy the habitats with sufficient and excessive moisture. In relation to the substrate, most species are epiphytes. The greatest variety of epiphytic lichen species is associated with aspen, willow and fir.

The data on the main functional parameters of more than 20 lichens species demonstrate the ability of boreal lichens to effectively use the environmental resources and quickly restore the functional activity after dehydration, exposure to low temperatures, excessive light and other factors. The chlorophyll content in the most lichens was about 0.5–0.6 mg/g DW, and the net CO₂ uptake rate varied depending on the species from 0.1 to 5.5 mg/(g DW · h). Optimal for the photobiont activity were temperatures in the range of 15–25 °C, and light intensity near to 25–30% of the total solar radiation. Lichen desiccation resulted to an increased dissipation of absorbed light energy as well as decreased net CO₂ assimilation rate. The rate of CO₂ gas exchange was positively correlated with nitrogen content. Cyanolichens accumulate 5–8 times more nitrogen compared to chlorolichens. Pools of the lichen biomass carbon and mineral elements are important for taiga ecosystems. Our results deepen the knowledge of the ecological-biological properties of lichen biota, and show the possibility of use the lichens as a sensitive sensor of environmental pollution and climate changes.

Keywords: lichens, biodiversity, ecological and biological traits, functional activity, environment, taiga zone, Komi Republic.

Лишайники являются неотъемлемым компонентом многих экосистем. Они выживают в экстремально суровых условиях Арктики и Антарктиды, встречаются в тундрах, пустынях, высокогорьях [1]. Однако наиболее благоприятные условия для обитания лишайников создаются в лесах. Бореальные леса занимают значительную часть территории Российской Федерации. В Республике Коми (РК) на долю лесных площадей приходится свыше 87% территории. Наибольшую площадь покрытых лесной растительностью земель занимают древостой ели (54%) и сосны (25%). Широко представлены производные берёзовые и осиновые леса (19%).

Целью данной работы было обобщение фундаментальных флористических, эколого-биологических и физиологических исследований лишенобиоты таёжной зоны Республики Коми.

Флористическое разнообразие лишайников

Систематические лишенологические исследования в таёжных лесах РК насчитывают почти четверть века [2]. К настоящему времени обнаружен 791 вид из 59 семейств и 184 родов. Видовое разнообразие и соотношение числа видов лишайников к числу видов сосудистых растений (0,9) свидетельствуют о богатстве флоры лишайников тайги [3]. Основу лишенофлоры составляют представители типичных для лесной зоны Голарктики семейств Cladoniaceae, Parmeliaceae, Lecanoraceae, Physciaceae, Pertusariaceae. Бореальный характер проявляется и в родовом спектре, прежде всего, за счёт высокого положения родов *Cladonia*, *Lecanora*, *Peltigera*, *Chaenotheca*, *Pertusaria* и др. Образцы представителей хранятся в УНУ «Научный гербарий Института биологии Коми НЦ УрО РАН (SYKO)».

Бореальные лишайники являются доминирующей по числу видов географической группой (более 60% видового состава). Неморальная группа объединяет около 22% лишайников. Участие представителей арктоальпийской, монтанной и мультizonальной групп незначительно.

В число охраняемых включено 85 видов лишайников, обитающих преимущественно на территориях природно-заповедного фонда РК. Многие редкие и охраняемые виды являются индикаторами девственных лесов. Ограничивают их распространение лесохозяйственная деятельность, прежде всего, рубка коренных старовозрастных древостоев, лесные пожары,

загрязнение атмосферы, изменение микроклиматических условий обитания.

Экологические и биологические особенности лишенофлоры

Длительный процесс адаптации лишайников к природным условиям того или иного региона способствует отбору видов по морфологическим и эколого-биологическим особенностям, наиболее соответствующим экологическим условиям этих регионов. В таёжной зоне РК преобладают накипные лишайники (66% всего видового состава), за ними следуют листоватые (17%) и кустистые (16%), меньше всего лишайников с чешуйчатой формой таллома (1%). Характерно преобладание эпифитных лишайников (62% от общего числа видов) над другими эколого-субстратными группами. Лиственные породы (осина, ива, берёза) характеризуются более богатым набором видов по сравнению с хвойными [2]. Довольно высока численность эпиксиллов – на их долю приходится более 20% всего числа видов. Эпигейные лишайники (14%) входят в состав мохово-лишайникового яруса, больше распространены в сосновых лесах. Другие группы (эпифиты, эпилиты) малочисленны.

По отношению лишайников к режиму увлажнения лидируют мезофиты и гигромезофиты – виды, предпочитающие местообитания с достаточной и избыточной влажностью.

Функциональные особенности лишайников

Представления о разнообразии и современном состоянии лишенобиоты бореальных лесов остаются неполными без данных о функциональных свойствах лишайников [4]. Лишайники – весьма сложный для физиологического изучения объект. Присутствие фотобионта превращает лишайник в автотрофную мутуалистическую систему. На долю фотобионта приходится около 10% биомассы таллома, однако его роль является ключевой в обеспечении существования всей ассоциации. Зелёные водоросли или цианобактерии осуществляют ассимиляцию углерода и поставляют продукты фотосинтеза и азотфиксации (у цианобактерий) клеткам микобионта. В этом отношении лишайники можно рассматривать как биолого-трофическую систему.

Известно, что лишайники могут быстро восстанавливать свои функции после обезвоживания или воздействия других неблагопри-

ятных факторов среды, включая низкие отрицательные температуры и ионизирующую радиацию. Полагают, что в основе высокой устойчивости лишайников лежат конститутивные механизмы поддержания структурно-функциональной целостности и индуцибельные механизмы, обеспечивающие репарацию повреждений, возникающих под действием стресс-факторов и при выходе из стресса [5, 6].

Наши исследования [4, 7, 8–10] направлены, в первую очередь, на изучение фундаментальных функций лишайников как пойкилогидрических фотоавтотрофных организмов. Особое внимание уделяли выявлению устойчивости лишайников к абиотическим факторам (температура, влажность, освещённость, УФ-радиация) и антропогенным воздействиям (тяжёлые металлы).

Активность лишайников прямо зависит от наличия воды в окружающей среде. При оводнённости 5–10% лишайники переходят в состояние криптобиоза [11]. В период выпадения обильных осадков содержание воды в них может в 2–3 раза превышать сухую массу таллома. Лишайники способны поглощать не только капельную воду, но и водяные пары из атмосферного воздуха [12]. Так, воздушно-сухие талломы *Lobaria pulmonaria* в насыщенной парами воды замкнутой камере интенсивно поглощали влагу, и в течение первых 0,5–1 ч экспозиции их масса увеличилась на 20% [8]. Важную роль в защите клеток от обезвоживания играют сахароспирты (полиолы), содержание которых может достигать 10% массы таллома, а также низкомолекулярные защитные белки – дегидрины. Повышение содержания дегидринов с молекулярной массой 40 и 43 кДа было выявлено нами при десикации талломов *L. pulmonaria* в природных условиях.

Фотосинтетические пигменты являются индикаторами фотобионта. Содержание хлорофилла *a* у 20 исследованных нами видов лишайников таёжной зоны РК варьировало в широких пределах: от 0,16 мг/г сухой массы (*Peltigera malacea*) до 1,3 мг/г (*P. rufescens*). Однако у большей части лишайников составляло 0,4–0,6 мг/г сухой массы, что сопоставимо с данными, приводимыми другими авторами [13].

Для насыщения нетто-поглощения CO_2 достаточно освещённости 25–30% полной солнечной. Следует отметить, что в местообитаниях лишайников большую часть светлого периода интенсивность света составляет не более 5% и только в разреженных сосновых борах достигает 15–20% полной солнечной.

В оптимальных условиях (температура, влажность) и насыщающей освещённости скорость нетто-поглощения CO_2 гидратированных талломов варьирует в пределах от 0,1 до 5,5 мг/г сухой массы · ч (медианное значение 0,81), а интенсивность дыхания – от 0,2 до 4,9 мг CO_2 /(г сухой массы · ч) (медианное значение 0,63). Интенсивность CO_2 -газообмена не зависела от жизненной формы и типа субстрата, но положительно коррелировала с содержанием азота в биомассе.

Наличие и доступность азота определяет многие процессы жизнедеятельности фототрофных организмов и флористическое разнообразие экосистем. Все цианолишайники отличались сравнительно высоким содержанием азота, до 40 мг/г сухой массы (*Peltigera scarbosa*, *P. ponoenjensis*), что обусловлено способностью цианопрокариот осуществлять биологическую азотфиксацию. Концентрация азота в хлоролишайниках в 5–8 раз ниже. Довольно низким содержанием азота (4–6 мг/г) характеризовались представители рода *Cladonia*, которые играют заметную роль в напочвенном покрове бедных азотом сосняков-беломошников. Промежуточную позицию занимали трёхбионтные лишайники, содержащие одновременно и зелёную водоросль, и цианобактерии. Среди исследованных видов наибольшая величина показателя, характеризующего скорость нетто-поглощения CO_2 в расчёте на единицу азота, была у хлоролишайника *Cetraria islandica* и составляла около 500 мг CO_2 /(г N · ч). У цианолишайников величина этого показателя была в 4–5 раз ниже, несмотря на более высокую ассимиляционную активность талломов. Содержание основного органогенного элемента углерода в сухой массе лишайников варьировало от 35 до 42%, а соотношение C/N – в пределах 8–12 [14].

Исследования на талломах эпифитного крупнолистоватого лишайника *L. pulmonaria* и эпигейных лишайниках рода *Cladonia* в полевых условиях показали, что в летний период днём их талломы выделяли CO_2 . Искусственное увлажнение талломов в дневные часы путём опрыскивания водой приводило к быстрому восстановлению положительного CO_2 -газообмена. Нетто-поглощение CO_2 регистрировали в ранние утренние часы, когда талломы гидратировались, поглощая пары влаги из воздуха и/или выпавшую росу. Лишайники, обитающие среди мхов на почве или на валеже, обезвоживаются в меньшей степени, чем эпифитные лишайники на стволах деревьев

или эпигейные лишайники в сквозистых сосновых борах. У лишайников, приуроченных к более влажному почвенному покрову, в дневные часы регистрировали нетто-поглощение CO₂. Для частичного восстановления положительного газообмена относительное содержание воды в талломах должно быть не менее 20–25%. Максимальные значения нетто-поглощения CO₂ наблюдали при оводнённости около 55%. Имеющиеся в литературе сведения [15] и наши данные показывают, что для фотосинтетической деятельности и роста лишайников бореальной зоны наиболее благоприятны переходные периоды (весна, осень) с относительной влажной и тёплой погодой.

Фотобионт бореальных лишайников сохраняет функциональную активность в довольно широком диапазоне температуры. Величина реального квантового выхода фотосистемы II (соотношение числа квантов, используемых в фотохимических превращениях к общему числу поглощённых квантов фотосинтетически активной радиации) у гидратированных талломов *Lobaria pulmonaria*, *Hypogymnia physodes*, *Platismatia glauca* не изменялась в интервале температуры 10–30 °С и составляла около 0,4 отн. ед. Полное ингибирование фотохимической активности фотобионта отмечали при 40 °С, тогда как при околонулевых температурах величина этого показателя сохранялась на уровне 25–30% от значений, регистрируемых в зоне температурного оптимума. Следует отметить, что устойчивость к высоким

температурам гидратированных лишайников довольно низкая, но в сухом виде они хорошо выдерживают гипертермию.

Лишайники таёжной зоны довольно устойчивы к низким отрицательным температурам. По нашим данным [8] температура фазового перехода вода-лёд в талломах *L. pulmonaria* в весенне-летний период составляла около -8 °С, а к зиме снижалась на 2–3 °С. Зимой после перемещения в комнатные условия талломы быстро (в течение 1–3 ч) восстанавливали положительный газообмен. Известно, что в сухом виде лишайники способны выдерживать экстремально низкие температуры и сохранять жизнедеятельность даже после экспозиции в жидком азоте. В наших экспериментах фотобионт *L. pulmonaria* проявлял фотохимическую активность после 3 суток выдерживания гидратированных талломов при t = -80 °С.

Значительный вклад в CO₂-газообмен вносит дыхание гетеротрофного микобионта [16]. В оптимальных условиях темновое дыхание талломов по интенсивности сопоставимо со скоростью нетто-поглощения CO₂ (табл.). В неблагоприятных условиях (недостаток влаги, избыточная или недостаточная освещённость, высокая интенсивность УФ-радиации, гипертермия, загрязнение среды поллютантами и др.) можно наблюдать снижение нетто-поглощения CO₂ вплоть до выделения CO₂ на свету. Как уже отмечалось, такое явление характерно при подсыхании талломов в летнее время.

Таблица / Table

Максимальные и минимальные величины основных функциональных показателей лишайников среднетаёжной зоны Республики Коми / Maximal and minimal values of the main functional indicators of lichens in the middle taiga of the Komi Republic

Показатель / Index	Мин. Min	Макс. Max	Ссылка Reference
Скорость фотосинтеза, мг CO ₂ /(г сухой массы · ч) Photosynthetic rate, mg CO ₂ /(g DW · h)	0,1	5,5	[4]
Скорость дыхания, мг CO ₂ /(г сухой массы · ч) Dark respiration rate, mg CO ₂ /(g DW · h)	0,2	4,9	
Содержание хлорофиллов, мг/г сухой массы Chlorophyll content, mg/g DW	0,16	1,33	
Содержание каротиноидов, мг/г сухой массы Carotenoids content, mg/g DW	0,06	0,43	[14]
Содержание углерода, мг/г сухой массы Carbon content, mg/g DW	350	420	
Содержание азота, мг/г сухой массы Nitrogen content, mg/g DW	3,5	40	
Содержание фосфора, мг/г сухой массы Phosphorus content, mg/g DW	0,36	2,7	
Содержание калия, мг/г сухой массы Potassium content, mg/g DW	1,0	9,0	

Более объективно о функциональной активности фотобионта можно судить по величине «гросс-фотосинтеза». Его величину выражают как сумму нетто-поглощения CO_2 талломами на свету и выделения CO_2 в темноте. Получаемая величина в 1,5–3 раза выше нетто-поглощения CO_2 и характеризует истинный фотосинтез.

Нами впервые исследовано дыхание и получены данные о соотношении дыхательных путей в талломах бореальных лишайников в норме и при стрессе. На гидратированных талломах 11 видов лишайников разной жизненной формы и экологической группы показано, что в оптимальных условиях их дыхание максимально сопряжено с образованием энергии. Интенсивность основного, сопряжённого с синтезом АТФ, цитохромного пути дыхания (ЦП), была выше активности альтернативного, энергодиссипирующего дыхательного пути (АП) в среднем в 3–4 раза. Установлено, что стрессы различной природы вызывали повышение активности АП на фоне снижения цитохромного дыхания. Вклад АП в общее дыхание лишайников достигал 50% и более в условиях загрязнения среды бокситовой пылью, при воздействии УФ-В радиации, промораживании и гипертермии. Есть основания полагать, что изменение в соотношении дыхательных путей и вовлечение АП в дыхание регулирует окислительно-восстановительный и энергетический баланс клеток при адаптации к воздействию неблагоприятных факторов среды [17].

Важную роль в устойчивости лишайников к внешним воздействиям играют лишайниковые вещества. Этот термин объединяет множество органических веществ – продуктов вторичного обмена, синтезируемых преимущественно клетками микобионта [18]. Вторичные метаболиты обычно локализуются на поверхности грибных гиф, плохо растворимы в воде и придают окраску талломам. Одной из функций таких веществ является защита лишайника от высокой инсоляции и избыточной УФ-радиации. В наших экспериментах экспонирование гидратированных талломов *Peltigera aphthosa* под лампами ЛЭР 40 М, спектр которых обогащён УФ-В радиацией, приводило к тому, что лишайники приобретали буровато-кирпичный оттенок в результате отложения на поверхности гифов верхнего корового слоя пигмента, экранирующего водорослевый слой [10]. Доза УФ, сопоставимая с естественной для ясного солнечного дня, не оказала существенного влияния на функ-

циональные показатели фотобионта. Характер спектров отражения указывает на присутствие в верхнем коровом слое пигмента меланина – высокомолекулярного полимерного соединения (продукт окислительной полимеризации аминокислоты тирозина). Явление меланизации верхней коры под действием избыточной инсоляции отмечено в ряде работ и для *L. pulmonaria* [19, 20]. Полагают, что роль меланинов в защите фотосинтетического аппарата клеток водоросли от фотоингибирования более значительна, чем фотопротекторные механизмы самой водоросли. Функцию защиты от избыточной инсоляции могут выполнять также лишайниковые полифенолы. Высоким содержанием фенольных кислот характеризуются обитающие в напочвенном покрове представители рода *Cladonia* [21].

Лишайники широко используются для оценки воздействия на среду антропогенных загрязнений. Немалое количество выбросов загрязняющих веществ обусловлено добычей полезных ископаемых открытым способом. На территории РК ведётся промышленная добыча бокситовой руды. В составе оседающей на растениях бокситовой пыли присутствуют оксиды алюминия, железа, кремния, тяжёлые металлы. Повышенное содержание Al, Fe, Mn, Pb, Ni и других токсичных веществ в талломах лишайников, обитающих на импактных участках, приводит к ухудшению жизненного состояния и снижению обилия лишайников [22]. Нами установлено, что при загрязнении среды бокситовой пылью значительная часть металлов локализовалась на поверхности лишайников [9]. Во внутриклеточной фракции обнаружено от 5–10% (Mn, Fe, Al, Cr, Pb) до 40% (Cu) всего их количества. Лишайники с загрязнённых участков отличались высоким уровнем липопероксидации и повышенной активностью антиоксидантных ферментов, что указывает на развитие окислительного стресса.

В литературе имеются довольно разрозненные сведения о фоновом содержании элементов в лишайниках из относительно незагрязнённой среды. Внимание исследователей больше сосредоточено на изучении элементного состава талломов в городах и промышленных районах с высоким уровнем аэротехногенного загрязнения. Определения макро- и микроэлементов в талломах 17 видов лишайников из различных районов таёжной зоны РК выявили присутствие катионов металлов Fe, Al, Mn, Zn, Cu и Cd во всех образцах, но их содержание было на 2–3 порядка ниже, чем

у лишайников, обитающих в зоне влияния бокситового рудника.

Заключение

Лишенофлора таёжной зоны Европейского Северо-Востока России характеризуется высоким таксономическим разнообразием. На территории Республики Коми к настоящему времени выявлен 791 вид лишайников, основная часть их обитает в лесных экотопах. Во всех лесных формациях преобладают бореальные виды. Доминирование видов, имеющих обширные ареалы (мультирегиональные и голарктические), свидетельствует о низкой специфичности лишенофлоры таёжной зоны. Преобладают виды, приуроченные к местообитаниям с достаточным и избыточным увлажнением. По отношению к субстрату большинство видов являются эпифитами. Наибольшее разнообразие эпифитных видов лишайников связано с листовыми породами. В сложении эпифитных сообществ высока доля видов с накипным талломом.

Бореальные лишайники способны эффективно использовать ресурсы среды и быстро восстанавливают функциональную активность после обезвоживания, воздействия низкими температурами, избыточной инсоляции и других природных факторов. Нами получены количественные данные, характеризующие основные функциональные свойства лишайников. В оптимальных условиях скорость нетто-поглощения CO_2 большинства лишайников составляет 1–2 мг/(г сухой массы · ч), снижение оводнённости приводит к депрессии фотосинтеза и выделению CO_2 на свету. Цианобионтные лишайники характеризовались более интенсивной метаболической активностью по сравнению с хлоролишайниками. Лишайники, особенно цианобионтные, могут играть заметную роль в азотном цикле таёжных экосистем, где этот элемент является лимитирующим. Исследования эколого-биологических свойств открывает перспективы для более глубокого понимания функционирования экосистем таёжной зоны Европейского Северо-Востока России.

Работа выполнена в рамках темы НИОКТР «Физиология и стресс-устойчивость фотосинтеза растений и пойкилогидрических фотоавтотрофов в условиях Севера» (№ АААА-А17-117033010038-7), при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-34-00346 мол_а.

Литература

1. Seaward M.R.D. Environmental role of lichens // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 274–298.
2. Пыстина Т.Н., Херманссон Я. Разнообразие лишайников Республики Коми: важнейшие итоги и перспективы дальнейших исследований // Современная ботаника в России: Тр. XIII съезда Русского ботанического общества и конференции «Научные основы охраны и рационального использования растительного покрова Волжского бассейна». Тольятти: Кассандра, 2013. Т. 1. С. 205–207.
3. Пыстина Т.Н. Лишайники таёжных лесов Европейского Северо-Востока: подзоны южной и средней тайги. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2003. 239 с.
4. Головки Т.К., Далькэ И.В., Дымова О.В., Захожий И.Г., Малышев Р.В., Силина Е.В., Табаленкова Г.Н., Шелякин М.А. Первые итоги эколого-физиологического изучения лишенобиоты бореальной зоны европейского северо-востока России // Современное состояние и перспективы развития сети особо охраняемых природных территорий европейского Севера и Урала. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2015. С. 279–286.
5. Kappen L., Valladares F. Opportunistic growth and desiccation tolerance the ecological success of poikilohydrous autotrophs // Handbook of Functional Plant Ecology. Marcel Dekker, Inc.: New-York, 1999. P. 121–194.
6. Beckett R.P., Kranner I., Minibayeva F.V. Stress physiology and symbiosis // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 134–151.
7. Головки Т.К., Далькэ И.В., Захожий И.Г., Малышев Р.В., Шелякин М.А., Табаленкова Г.Н., Дымова О.В. Экофизиология листоватого лишайника *Lobaria pulmonaria* в среднетаёжной зоне на европейском северо-востоке России // Лихенология в России: актуальные проблемы и перспективы исследований: Труды Второй Международной конференции, посвящённой 300-летию Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН и 100-летию Института споровых растений. Санкт-Петербург: Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, 2014. С. 69–74.
8. Головки Т.К., Далькэ И.В., Дымова О.В., Малышев Р.В., Плюснина С.Н., Пыстина Т.Н., Семёнова Н.А., Табаленкова Г.Н., Шелякин М.А. Функциональная экология лишайника *Lobaria pulmonaria* в таёжной зоне на европейском северо-востоке России // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2018. № 3 (35). С. 23–33.
9. Головки Т.К., Шелякин М.А., Захожий И.Г., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н., Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таёжной зоне // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 44–53.
10. Шелякин М.А., Захожий И.Г., Головки Т.К. Изменение дыхания и соотношения дыхательных путей при адаптации лишайников к действию УФ-В радиации //

Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. 2018. № 3 (5). С. 100–104.

11. Слонов Л.Х., Слонов Т.Л., Ханов З.М. Эколого-физиологические особенности лишайников горной системы центральной части Северного Кавказа. Нальчик: Эльбрус, 2009. 158 с.

12. Green T.G.A., Nash III T.N., Lange O.L. Physiological ecology // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 153–181.

13. Palmqvist K., Campbell D., Ekblad A., Johansson H. Photosynthetic capacity in relation to nitrogen content and its partitioning in lichens with different photobionts // Plant, Cell and Environment. 1998. V. 21. P. 361–372.

14. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головко Т.К. Элементный состав некоторых видов лишайников бореальной зоны на европейском Северо-Востоке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 221–225.

15. MacKenzie T.D., MacDonald T.M., Dubois L.A., Campbell D.A. Seasonal changes in temperature and light drive acclimation of photosynthetic physiology and macromolecular content in *Lobaria pulmonaria* // Planta. 2001. V. 214. No. 1. P. 57–66.

16. Palmqvist K. Carbon economy in lichens // New Phytologist. 2000. V. 148. No. 1. P. 11–36.

17. Selinski J., Scheibe R., Day D.A., Whelan J. Alternative oxidase is positive for plant performance // Trends in Plant Science. 2018. V. 23. No. 7. P. 588–597.

18. Elix J.A., Stocker-Wörgötter E. Biochemistry and secondary metabolites // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 104–133.

19. Mafole T.C., Chiang C., Solhaug K.A., Beckett R.P. Melanisation in the old forest lichen *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. reduces the efficiency of photosynthesis // Fungal Ecology. 2017. V. 29. P. 103–110.

20. Минибаева Ф.В., Рассабина А.Е., Beckett R.P. Меланины лишайников: структура, биосинтез функции // Лишайники: от молекул до экосистем: Программа и тезисы докладов Международной конференции. Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. С. 61–62.

21. Hall R.S.B., Bornman J., Björn L.A. UV-induced changes in pigment content and light penetration in the fruticose lichen *Cladonia arbuscula* ssp. *Mitis* // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2002. No. 66. P. 13–20.

22. Пыстина Т.Н., Кузнецова Е.Г. Оценка степени загрязнения растительности и почв в зоне воздействия Средне-Тиманского бокситового рудника // Механизмы устойчивости и адаптации биологических систем к природным и техногенным факторам: Материалы Всероссийской научной конференции. Киров: Веси, 2015. С. 314–317.

2. Pystina T.N., Hermansson J. Variety of lichens of the Komi Republic: the most important results and prospects for further research // Modern Botany in Russia: Trudy XIII s'ezda Russkogo botanicheskogo obshchestva i konferentsii "Nauchnyye osnovy okhrany i ratsionalnogo ispolzovaniya rastitelnogo pokrova Volzhskogo basseyna". Tolyatti: Kassandra, 2013. V. 1. P. 205–207 (in Russian).

3. Pystina T.N. Lichens of taiga forests of the European Northeast: subzones of the southern and middle taiga. Yekaterinburg: Uralskoye otdeleniye RAN, 2003. 239 p. (in Russian).

4. Golovko T.K., Dalke I.V., Dymova O.V., Zakhzhizhiy I.G., Malyshev R.V., Silina E.V., Tabalenkova G.N., Shelyakin M.A. The first results of the ecological and physiological study of the lichen biota of the boreal zone of the European north-east of Russia // Current status and development of the specially protected natural areas network of the European North and the Ural. Syktyvkar: IB Komi NTS UrO RAN, 2015. P. 279–286 (in Russian).

5. Kappen L., Valladares F. Opportunistic growth and desiccation tolerance the ecological success of poikilohydrous autotrophs // Handbook of Functional Plant Ecology. Marcel Dekker, Inc.: New-York, 1999. P. 121–194.

6. Beckett R.P., Kranner I., Minibayeva F.V. Stress physiology and symbiosis // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 134–151.

7. Golovko T.K., Dalke I.V., Zakhzhizhiy I.G., Malyshev R.V., Shelyakin M.A., Tabalenkova G.N., Dymova O.V. Eco-physiology of foliose lichen *Lobaria pulmonaria* in the middle taiga zone in the European northeast of Russia // Lichenology in Russia: current problems and research prospects: Trudy Vtoroy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchonnoy 300-letiyu Botanicheskogo instituta im. V.L. Komarova RAN i 100-letiyu Instituta sporovykh rasteniy. Sankt-Peterburg: Botanicheskiy institut im. V.L. Komarova RAN, 2014. P. 69–74 (in Russian).

8. Golovko T.K., Dalke I.V., Dymova O.V., Malyshev R.V., Plyusnina S.N., Pystina T.N., Semenova N.A., Tabalenkova G.N., Shelyakin M.A. Functional ecology of lichen *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. in the taiga zone in the European Northeast of Russia // Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN. 2018. No. 3 (35). P. 23–33 (in Russian). doi: 10.19110/1994-5655-2018-3-23-33

9. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Zakhzhizhiy I.G., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. The response of lichens to the environmental pollution under the bauxite mining in the taiga zone // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1

10. Shelyakin M.A., Zakhzhizhiy I.G., Golovko T.K. Change of total respiration and respiratory pathways ratio in lichens adaptation to UV-B radiation // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2018. No. 3 (5). P. 100–104 (in Russian). doi: 10.31040/2222-8349-2018-5-3-100-104

References

1. Seaward M.R.D. Environmental role of lichens // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 274–298.

11. Slonov L.Kh., Slonov T.L., Khanov Z.M. Ecological and physiological features of lichens in the mountain system of the central part of the North Caucasus. Nalchik: Elbrus, 2009. 158 p. (in Russian).
12. Green T.G.A., Nash III T.N., Lange O.L. Physiological ecology // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 153–181.
13. Palmqvist K., Campbell D., Ekblad A., Johansson H. Photosynthetic capacity in relation to nitrogen content and its partitioning in lichens with different photobionts // Plant, Cell and Environment. 1998. V. 21. P. 361–372.
14. Tabalenkova G.N., Dalke I.V., Golovko T.K. Biomass elemental composition of some lichen species in the boreal zone of European Northeast // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2016. V. 18. No. 2. P. 221–225 (in Russian).
15. MacKenzie T.D., MacDonald T.M., Dubois L.A., Campbell D.A. Seasonal changes in temperature and light drive acclimation of photosynthetic physiology and macromolecular content in *Lobaria pulmonaria* // Planta. 2001. V. 214. No. 1. P. 57–66. doi: 10.1007/s004250100580
16. Palmqvist K. Carbon economy in lichens // New Phytologist. 2000. V. 148. No. 1. P. 11–36. doi: 10.1046/j.1469-8137.2000.00732.x
17. Selinski J., Scheibe R., Day D.A., Whelan J. Alternative oxidase is positive for plant performance // Trends in Plant Science. 2018. V. 23. No. 7. P. 588–597. doi: 10.1016/j.tplants.2018.03.012
18. Elix J.A., Stocker-Wörgötter E. Biochemistry and secondary metabolites // Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 104–133.
19. Mafole T.C., Chiang C., Solhaug K.A., Beckett R.P. Melanisation in the old forest lichen *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. reduces the efficiency of photosynthesis // Fungal Ecology. 2017. V. 29. P. 103–110. doi: 10.1016/j.funeco.2017.07.004
20. Minibaeva F.V., Rassabina A.E., Beckett R.P. Lichen melanins: structure, function and biosynthesis // Lichens: from molecules to ecosystems: Programma i tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii. Syktyvkar: IB FITS Komi NTS UrO RAN, 2019. P. 61–62 (in Russian).
21. Hall R.S.B., Bornman J., Björn L.A. UV-induced changes in pigment content and light penetration in the fruticose lichen *Cladonia arbuscula* ssp. *Mitis* // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2002. No. 66. P. 13–20. doi: 10.1016/S1011-1344(01)00270-6
22. Pystina T.N., Kuznecova E.G. Assessment of the vegetation and soils pollution degree in the zone affected by the Middle Timan bauxite mine // Mechanisms of biological systems stability and adaptation to natural and technogenic factors: Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. Kirov: Vesi, 2015. P. 314–317 (in Russian).

Значение озимой ржи для сохранения природного агроэкологического баланса и здоровья человека (обзор)

© 2020. В. А. Сысеев, академик РАН, научный руководитель,
Л. И. Кедрова, д. с.-х. н., в. н. с., Е. И. Уткина, д. с.-х. н., зав. отделом,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный
научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»,
610007, Россия, Кировская обл., г. Киров, ул. Ленина, д. 166-а,
e-mail: utkina.e.i@mail.ru

Рассмотрено значение озимой ржи (*Secale cereale* L.) в изменяющихся погодно-климатических условиях и нарастающей химико-техногенной нагрузке в растениеводстве. Высокая адаптационная способность позволяет получать стабильный урожай зерна ржи во многих регионах страны. Сохраняя плодородие и улучшая фитосанитарное состояние почвы, она является незаменимым предшественником в севообороте. Это оптимальная зерновая культура для развития органического земледелия. В Госреестре РФ среди отечественных зимостойких сортов 8 – селекции ФАНЦ Северо-Востока. Наиболее востребованы Фалёнская 4, Рушник, Флора и Графиня. Создан первый в стране кислотоустойчивый сорт Кипрез; передан на сортоиспытание новый сорт Батист. Наряду с многофункциональным использованием ржи в кормопроизводстве и на технические цели, основное её назначение – продовольственное. По пищевой и физиологической ценности зерно ржи имеет много преимуществ по сравнению с пшеницей. Так, содержание витамина Е в зерне озимой ржи больше в 1,5–2,0 раза. Зерно характеризуется повышенным содержанием природных антиоксидантов. Культура более устойчива к накоплению микотоксинов, менее требовательна к внесению удобрений и обработке ядохимикатами. Озимая рожь является совершенным сырьём для производства здорового и профилактического питания.

Ключевые слова: озимая рожь, адаптивность, стрессоустойчивость, средолучшающие свойства, многофункциональное использование, здоровое питание.

Importance of winter rye for maintaining natural agroecological balance and human health ((review)

© 2020. V. A. Sysuev ORCID: 0000-0002-1172-005X[†]
L. I. Kedrova ORCID: 0000-0001-9840-860X[†]
E. I. Utkina ORCID: 0000-0001-5650-6906[†]

Federal Agricultural Scientific Center of the North-East named N.V. Rudnitskiy,
166-a, Lenina St., Kirov, Kirov Region, Russia, 610007,
e-mail: utkina.e.i@mail.ru

The significance of winter rye (*Secale cereale* L.) under changing weather and climatic conditions and increasing chemical-technogenic load in crop production is considered. High adaptive ability allows you to get a stable crop of rye grain in many regions of the country. Preserving fertility and improving the phytosanitary condition of the soil, it is an indispensable precursor in crop rotation. This is the optimal grain crop for the development of organic farming. In the State Register of the Russian Federation, among domestic winter-hardy varieties, there are 8 breeds of the North-East FARC. The most popular are Falenskaya 4, Rushnik, Flora and Grafinya. The country's first acid-resistant Kiprez variety has been created; a new variety of Batiste was submitted for variety testing. Along with the multifunctional use of rye in food, feed production and for technical purposes, its main purpose is food. In terms of nutritional and physiological value, rye grain has many advantages over wheat. So, the content of vitamin E is 1.5–2.0 times greater, characterized by a high content of natural antioxidants, more resistant to the accumulation of mycotoxins, less demanding on fertilizer application and processing with pesticides. It is the perfect raw material for the production of healthy and preventive nutrition.

Keywords: winter rye, adaptability, stress resistance, medium-improving properties, multifunctional use, healthy nutrition.

Для эффективного использования разнообразных природных условий регионов страны необходимо правильно подбирать генофонд возделываемых сельскохозяйственных культур. В северной части Европейского Нечерноземья особого внимания заслуживает озимая рожь. Тысячелетиями продвигаясь как сорняк с юга на север, рожь прочно заняла одно из главенствующих положений в земледелии многих регионов России. Её высокая адаптационная способность, стабильность получения урожая зерна, агротехническая значимость как хорошего предшественника в сочетании с традиционным использованием в питании, кормопроизводстве, получении крахмала, спирта, при производстве дрожжевых препаратов пищевого и лечебного назначения и т. д., ставят рожь в ряд стратегических сельскохозяйственных культур [1, 2].

Среди зерновых рожь предъявляет самые низкие требования к плодородию почвы, внесению удобрений и пестицидов, т. е. позволяет получать экологически чистое и дешёвое зерно, что необходимо для развития перспективного направления – органического земледелия.

Отдавая предпочтение озимой ржи как продовольственной культуре, мы признаём её многофункциональное универсальное назначение: на кормовые и технические цели, как незаменимое звено в севообороте для создания устойчивого агрофитоценоза; для эффективного использования и сохранения природной среды и др.

В условиях нарастающей химико-техногенной интенсификации растениеводства, глобального и локального изменения погодноклиматических условий возрастает средоулучшающая роль культуры озимой ржи при формировании агробиогенотических процессов.

Рожь отличается хорошо развитой корневой системой, проникающей на глубину до полутора метров и высокой усвояющей способностью. У ржи, по сравнению с пшеницей, в 1,5 раза мощней развита корневая система, которая эффективно поглощает воду и питательные вещества из глубинных слоёв почвы, что позволяет формировать стабильный урожай на низкоплодородных землях и при дефиците влаги.

Глубоко проникающие корни растений ржи, улучшая структуру и плодородие почвы, положительно влияют на её фитосанитарное состояние. Средообразующие возможности способствуют очищению полей от сорняков,

которые являются резерваторами болезней и вредителей. Благодаря фитосанитарной роли, обогащающим плодородие и очищающим от сорных трав свойствам, рожь считается незаменимым предшественником в севообороте на почвах с низким плодородием. При посеве озимой ржи в смеси с бобовыми культурами улучшается биологическое равновесие и физическое состояние почвы за счёт способности бобовых к симбиотической азотфиксации [3].

Во многих странах мира рожь эффективно используют для разработки заброшенных и малоплодородных земель в качестве первой культуры. Количество вовлечённых в сельское хозяйство заброшенных пахотных земель в РФ достигает почти 50 млн га. При их освоении ведущая роль в севообороте может быть отведена озимой ржи, как ключевой культуре в восстановлении нарушенных земель и улучшении агроэкологического баланса территории страны.

Исключительное преимущество озимой ржи состоит в том, что она является самой холодостойкой культурой среди зерновых злаков, что особенно важно для северных регионов Нечерноземья страны [4]. Способность ржи более полно использовать осенне-зимние осадки и сравнительно небольшой коэффициент транспирации обуславливают засухоустойчивость этой культуры [5].

Неоспоримым достоинством озимой ржи перед другими зерновыми культурами является её высокая кислотоустойчивость. Кислые почвы, которых в Нечернозёмной зоне России более 60 млн га от общей площади пашни [6], способны снизить урожайность сельскохозяйственных культур до 80% [7]. В Северо-Восточном регионе низкоплодородные кислые почвы занимают более 70% пашни, а в Кировской области их более 80%. При этом почти 35% – почвы сильнокислые ($\text{pH} < 4,5$) с повышенным содержанием ионов Al^{3+} [8].

Кислая среда почвы снижает поступление в растения элементов питания, тормозит развитие благоприятных микробиологических процессов [9], способствует развитию различных заболеваний, особенно снежной плесени *Microdochium nivale*, что характерно для Кировской области, Удмуртской Республики и Пермского края. На почвах с повышенной кислотностью среди зерновых культур наиболее успешно может произрастать только озимая рожь [6].

Ни одна зерновая культура не может сравниться с рожью по адаптивности и стрессоустойчивости, способности давать стабильный урожай зерна в неблагоприятные и экс-

тремальные по погодным условиям годы, какими были почти половина лет последнего десятилетнего периода. Являясь культурой низкого экологического и экономического риска, рожь традиционно считается страховой зерновой культурой в большинстве сельскохозяйственных регионов страны. При этом важно внедрение адаптивных, высокозимостойких и урожайных сортов.

Россия располагает широким набором отечественных сортов озимой ржи. Сегодня, несмотря на активные попытки по интенсивному продвижению на рынок зарубежных сортов, посевные площади озимой ржи в России почти на 100% заняты сортами отечественной селекции, что свидетельствует о конкурентоспособности достижений российских селекционеров. Отработаны технологии производства зерна с учётом природных ресурсов и изменяющихся условий среды для экологически безопасного развития экономики регионов.

В Федеральном аграрном научном центре Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого (ФАНЦ Северо-Востока) созданы адаптивные сорта озимой ржи для широкого ареала распространения. В настоящее время в Госреестре селекционных достижений РФ находится 8 сортов с допуском к использованию в 6 регионах страны. Наиболее востребованы в производстве сорта Фалёнская 4, Рушник, Флора и Графиня, возделываемые в 32 областях и республиках России. Создан первый в стране кислотоустойчивый сорт озимой ржи Кипрез, защищённый патентом в 2019 г.; передан на Государственное сортоиспытание новый сорт Батист. Уникальность сортов ФАНЦ Северо-Востока заключается в том, что они сочетают высокую зимостойкость, стабильную продуктивность, устойчивость к полеганию, толерантность к основному, лимитирующему урожайность заболеванию снежной плесени, с высокими хлебопекарными свойствами. Свообразные почвенно-климатические условия региона позволяют создавать долговечные сорта, такие как Вятка 2 с 70-ти летней историей производственного использования. В ФАНЦ

Северо-Востока на основе сортов озимой ржи с высокими хлебопекарными свойствами разработаны 26 сортов хлеба и 16 видов мучных кондитерских изделий, которые характеризуются пониженной калорийностью, повышенной пищевой и биологической ценностью. В рецептуре новых хлебных изделий содержание ржаного сырья достигает 75% [10].

На протяжении XII–XIX вв. рожь была на Руси не только главной продовольственной, но и стратегической культурой в оптимизации системы «биологические ресурсы – питание – здоровье». По пищевой и физиологической ценности рожь имеет целый ряд преимуществ, в сравнении с пшеницей. Зерно ржи располагает богатейшим спектром природно-сбалансированных питательных веществ, включая витамины, микроэлементы, незаменимые аминокислоты, клетчатку – всё, что жизненно необходимо для человека [11]. По сравнению с белком молока питательная ценность белка в зерне ржи достигает 83%, тогда как пшеницы – в два раза меньше [12].

Селен, хром и витамин Е, представленные в ржаном хлебе в оптимальном соотношении, обеспечивают организму отличную защиту от онкологических заболеваний и преждевременного старения. Содержание витамина Е в ржаном зерне в 1,5–2,0 раза больше, чем в пшеничном. Важная функция этого витамина заключается в сохранении плода, оптимальной работе мышц, вынашивании и появлении на свет здорового потомства. Комплекс витаминов группы В благоприятно влияет на состояние нервной системы человека. По количеству витамина В₂ рожь значительно превосходит пшеницу [12] (табл. 1).

Ржаное зерно является источником повышенного содержания иода и железа. Благодаря богатому содержанию полиненасыщенных жирных кислот Омега-3 и Омега-6 нормализуется уровень холестерина и работа сердца.

Настоящий ржаной хлеб – это продукт с высоким содержанием клетчатки. По данным финских учёных по содержанию раство-

Таблица 1 / Table 1

Содержание витаминов в зерне ржи и пшеницы, мг/100 г
Vitamin content in rye and wheat grains, mg/100 g

Витамины / Vitamins	Рожь / Rye	Пшеница / Wheat
В ₁	0,13–0,78	0,20–0,70
В ₂	0,10–0,80	0,02–0,16
Е	10	4,20–7,50
Бета-каротин / Beta carotene	0,3	0,21–0,27

Таблица 2 / Table 2

Результаты оценки образцов хлеба из разных сортов муки (2006 г.)
Results of evaluation of bread samples from different flour kinds (2006)

Показатели / Traits	Образцы хлеба / Bread samples		
	хлеб из обойной муки грубого помола (95%-ного выхода) coarse bread from dark rye flour (95%-yield)	хлеб из обдирной муки (87%-ного выхода) bread from medium rye flour (87%-yield)	± к хлебу из обдирной муки, % ± to bread from medium rye flour, %
Энергетическая ценность, ккал/100 г Energy value, kcal/100 g	165,9	172,7	-3,9
Общий жир, % / Total fat, %	1,13	1,36	-16,9
Белки, % / Protein, %	6,88	6,35	+8,3
Крахмал, % / Starch, %	29,39	31,39	-6,4
Пищевые волокна, % Dietary fibers, %	11,1	9,4	+18,1
в т. ч. нерастворимые Including insoluble	10,2	7,9	+29,1
Зола, % / Ash, %	1,84	1,65	+11,5
K, мг/кг / K, mg/kg	3241	2200	+47,3
Ca, мг/кг / Ca, mg/kg	253	209	+21,1
Mg, мг/кг / Mg, mg/kg	430	346	+24,3
Fe, мг/кг / Fe, mg/kg	13,1	10,2	+28,4
Витамин В ₂ , мг% В ₂ vitamin, mg%	0,14	0,10	+40,0
В ₆ , мг% / mg %	0,18	0,16	+12,5
Е, мг% / E, mg%	1,24	1,06	+17,0

римой клетчатки, наиболее ценной диетологами, ржаной хлеб намного превышает распространённые овощи и фрукты [13]. Содержание клетчатки в зерне ржи на 100 г продукта составляет 14,0, в т. ч. растворимой – 4,97 г. При этом в зерне пшеницы содержится клетчатки 11,0 г, а растворимой – 2,75 г. Клетчатка ржаного хлеба улучшает работу желудочно-кишечного тракта, регулирует уровень сахара и холестерина в крови, нормализует кровяное давление [14]. При этом среднее потребление клетчатки современного россиянина в 4 раза ниже дневной нормы, что, безусловно, отрицательно влияет на состояние здоровья населения.

В Финляндии и некоторых других скандинавских странах, где ржаной хлеб составляет основу здорового питания, практически отсутствует массовая проблема ожирения, которой сейчас страдают более 2 млрд человек или 30% населения Земли, проживающих в 10 странах мира, включая Россию. Главная угроза состоит в том, что растёт частота ожирения среди детей. За последние 30 лет число детей, страдающих от ожирения и избыточного веса, возросло на 50%.

Ни один народ в мире не изменил так кардинально своё питание, как российский, отказавшись от самого необходимого – настоящего ржаного хлеба. Рожь, когда-то главная по значимости хлебная культура России, сейчас утратила ведущие позиции. В два раза уменьшилось производство хлеба, вырабатываемого с использованием ржаной муки. Доля хлебобулочных изделий из смеси пшеничной и ржаной муки составляет около 30%, а из чисто ржаной муки – всего 4%.

Сегодня практически не стало ржаного хлеба из муки грубого помола. А полноценным можно назвать ржаной хлеб только из муки грубого помола на заквасках, который был и остаётся символом национальной самобытности.

Мука из цельного зерна (обойная) имеет повышенное содержание белков, жиров, зольных элементов и пищевых волокон. Современные технологии и оборудование производят менее полноценную сеяную и обдирную муку, которая в основном используется в хлебопечении.

Наши совместные исследования с Институтом питания РАМН показали, что хлеб из ржаной обойной муки (95%-ного выхода)

превосходит хлеб из ржаной обдирной муки (87%-ного выхода) по содержанию калия, кальция, магния и железа на 47,3; 21,1; 24,3 и 28,4% соответственно. Витамина Е больше на 17,0%, пищевых волокон – на 18,1% (табл. 2).

Поэтому ржаной хлеб грубого помола благотворно влияет на состояние всего организма, поддерживая сердечнососудистую систему и работу кишечника. Благодаря оптимальному сочетанию жизненно необходимых компонентов настоящий ржаной хлеб из муки грубого помола способствует выведению из организма токсинов, тяжёлых металлов и других вредных веществ, поддерживает уровень сахара в крови и является профилактикой сахарного диабета второго типа.

В последние годы возрастает интерес учёных к природным антиоксидантам, так как они способны защитить человека не только от онкологических заболеваний, но и от преждевременного старения. Зарубежными исследователями установлено, что среди зерновых культур по данному показателю выгодно отличается зерно озимой ржи [15].

На современном этапе всё больше заостряется внимание на загрязнении зерна и зернопродуктов микотоксинами. Это представляет серьёзную опасность для здоровья человека. Среди зерновых культур рожь считается наиболее безопасной в отношении накопления в зерне микотоксинов [16].

Учитывая многие преимущества зерна ржи, ему отдаётся предпочтение в производстве продуктов здорового и диетического питания. В своё время Национальное космическое Агентство США (НАСА) еженедельно доставляло специально выпеченный ржаной хлеб из Москвы для астронавтов. Ржаной хлеб рекомендован морякам-подводникам и всем работникам атомной промышленности. Тяжёлых металлов и радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в зерне ржи накапливается в 3–4 раза меньше, чем в бобовых, гречке и пшенице [17].

В странах Западной Европы ржаному хлебу давно уделяется особое внимание. ЮНЕСКО признало ржаной хлеб объектом мирового культурного наследия. Активно проводят исследования по значению ржи в питании и медицине учёные скандинавских стран. В Финляндии на протяжении десятилетий успешно работает государственная программа «Рожь», направленная на оздоровление населения страны. Не случайно сегодня средняя продолжительность жизни в Финляндии составляет 75 лет у мужчин, 82 года – у женщин (в России – соответственно 59 и 73 года).

Помимо продовольственного назначения озимая рожь всегда служила незаменимым высокоэнергетичным кормом для животных. Во-первых, это самый ранний зелёный корм для всех видов животных и птицы. Зелёную массу можно использовать для закладки раннего силоса и сенажа, на приготовление травяной муки, гранул и т. д. Возделывание в смеси с бобовыми культурами значительно обогащает корм протеином, что эффективно для закладки зерносенажа. Зерно озимой ржи традиционно используется в комбикормах, как основной источник энергии и достаточного количества протеина [18]. За последние годы в Германии для кормопроизводства используется 40–50% выращенной ржи, в Польше – 1/3 урожая [19]. В европейских странах повышается интерес ко ржи для откорма свиней, что позволяет получать высококачественное «зернистое сало» [20]. В России на кормовые цели используется всего 8–12% от общего производства зерна этой культуры. При этом совместными исследованиями с Институтом кормов им. В.Р. Вильямса доказана возможность увеличения норм скармливания зерна ржи крупному рогатому скоту в составе концентрированных кормов до 70%, так как при дополнительных обработках действие антипитательных факторов снижается [21–23].

Рационы скота и птицы, обогащённые ценным ржаным кормом, обеспечивают качественную продукцию животноводства, которая поступает в организм человека согласно естественной цепи «корма – сельскохозяйственные животные – мясомолочная продукция – человек» и способствует поддержанию здоровья.

В западных странах отмечается прогресс в направлении глубокой переработки зерна ржи на крахмал, сахаристые и белковые продукты пищевого, кормового и даже медицинского назначения [24]. В России не используется выгодная возможность переработки ржи на крахмал высокого качества, ежегодный импорт которого составляет более 140 тыс. т. Разработка технологии белковых продуктов, композитов с заданным составом и функциональными свойствами является одним из приоритетных направлений увеличения и совершенствования ресурсов продовольственного белка из зерна озимой ржи [25–27].

В условиях негативной тенденции изменения экологического состояния окружающей природной среды важен поиск и реализация путей снижения загрязнения атмосферы. Озимая рожь является идеальной культу-

рой в решении мировой проблемы производства биологической энергии из возобновляемого растительного сырья. Активно развивается данный сектор экономики в Германии [28, 29]. Для производства биогаза и биоэтанола здесь используется почти третья часть производимого зерна ржи, что улучшает экологическое равновесие и существенно повышает конкурентоспособность этой культуры [30].

Несмотря на неоспоримо важное значение и многофункциональное использование стратегической для России зерновой культуры, наиболее приспособленной к почвенно-климатическим и этническим особенностям, производство зерна озимой ржи в нашей стране находится в глубоком кризисе. Сейчас посевные площади этой культуры составляют в стране менее 1 млн га.

В российском климате производство озимой ржи на протяжении веков было гарантом продовольственной безопасности государства. Её посевы стабильно удерживались на уровне 25–27 млн га и составляли 50–58% от мировых. Сейчас Россия занимает чуть более трети посевных площадей; удельный вес в мировом производстве зерна ржи составляет всего 23,4%. Россия, для которой рожь была национальным символом страны, теряет свою вековую культуру.

Россия уступает Германии и Польше по площадям, валовым сборам зерна ржи и значительно отстаёт от производства зерна на душу населения. Считается, что для нормального жизнеобеспечения необходимо производить около 100 кг зерна ржи в год на человека. В начале прошлого века в России на одного человека приходилось 140 кг, в настоящее время – почти в 5 раз меньше. По этому показателю РФ уже уступает странам Евросоюза и в 4 раза – Республике Беларусь [30].

Теряются исторически сложившиеся приоритеты производства зерна ржи в Кировской, Нижегородской областях, Пермском крае, Республике Удмуртия, где преобладают низкоплодородные кислые почвы, на которых стабильно может расти только рожь. Почвенно-климатические ресурсы многих регионов страны используются неэффективно.

Таким образом, краткий обзор значения традиционной для России культуры озимой ржи показывает, что она является наиболее адаптивной среди зерновых культур к почвенно-климатическим условиям большинства регионов страны. Её средоулучшающие возможности способствуют укреплению, сохранению и восстановлению природного

экологического равновесия. Зерно озимой ржи является совершенным сырьём для производства продуктов здорового и диетического питания, особенно для населения северных регионов России.

Для того, чтобы преодолеть кризис производства зерна ржи в стране, требуется создание Федеральной целевой программы «Рожь России». Необходимо разработать механизмы стимулирования производства зерна ржи, пересмотреть «дискриминационную» ценовую политику, посредством которой она вытесняется с наших полей [30], расширить возможности диверсификации зерна, поднять значение культуры на более высокий уровень для обеспечения внутренних потребностей страны и оздоровления населения.

References

1. Sysuev V.A., Ren Changzhong, Kedrova L.I., Utkina E.I., Lapteva N.K. Rye for a food and health of man. Baicheng, the Peopl's Republic of China, 2011. 196 p. (in Chinese).
2. Sysuev V.A., Kedrova L.I., Utkina E.I., Chanchzhun Zh. Prospects of production of winter rye for multifunctional use // Management and research on scientific & technological events. 2016. No. 6. P. 31–34 (in Chinese).
3. Figurin V.A. Growing perennial herbs for food. Kirov: NIISH Northeast, 2013. 188 p. (in Russian).
4. Janda T., Szalai G., Rios-Gonzalez K., Veisz O., Paldi E. Correlation between frost tolerance and antioxidant activities in cereals // Acta Biologica Szegediensis. 2002. V. 46 (3–4). P. 67–69.
5. Parfenova E.S., Shamova M.G., Nabatova N.A., Psareva E.A. Assessment of the relative drought resistance of varieties of winter rye, method of germination on sucrose // Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2018. No. 11 (Part 2). P. 347–351 (in Russian).
6. Yugaj A.M. Efficiency of production and level of soil acidity // Vestnik APK Verkhnevolzh'ya. 2015. No. 4 (32). P. 3–8 (in Russian).
7. Kedrova L.I., Utkina E.I., Shlyahtina E.A., Konovalova S.V. Adaptive potential of winter rye varieties in conditions of soil stress in the North-East of the Non-Black Earth Zone of Russia // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2012. No. 6. P. 26–28 (in Russian).
8. Burkov N.A. Environmental protection of the Kirov region: Problems and prospects. Kirov, 1993. 352 p. (in Russian).
9. Shirokih I.G., Shirokih A.A. Microbial communities of acid soils of Kirov region. Kirov: NIISH Northeast, 2004. 332 p. (in Russian).
10. Lapteva N.K. The range of bakery and flour confectionery products using rye raw materials and its role in

the nutrition of modern man // Dostizhenie nauki i tekhniki APK. 2012. No 6. P. 75–78 (in Russian).

11. Sysuev V.A., Kedrova L.I., Utkina E.I. Rye – strategic grain culture in the development of adaptive crop production and food security of Russia // Obrazovanie, nauka i proizvodstvo. 2014. No. 2–3. P. 31–33 (in Russian).

12. Kobylyanskij V.D., Korzun A.E., Katerova A.G., Lapikov N.S., Soloduhina O.V. Cultural flora of the USSR. Leningrad: Agropromizdat: Leningradskoe Otdelenie, 1989. V. II. Part I. 368 p. (in Russian).

13. Rauramo U., Koskinen R. Nutrition reference (new). Finlyandiya: Leipatiedotus, 2004. P. 24 (in Russian).

14. Aman P. Health aspects of rye // EUCARPIA: International Symposium on rye breeding and genetics. Germane, 2006. P. 22.

15. Zelinski H., Koslowska H. Antioxidant activity and total phenolics in selected cereal grains and their different morphological fractions // J. Agric. Food Chem. 2000. V. 48 (6). P. 2008–2016.

16. Herman V. Calm, calm only // Novoe selskoe khozyaystvo. 2019. No. 3. P. 82–85 (in Russian).

17. Skorik V. Rye, which we lost // Zerno. 2012. No. 11. P. 48–53 (in Russian).

18. Voloshina T.A. Energy efficiency of winter rye growing on feed in the conditions of the Maritime Territory // Dalnevostochny agrarny vestnik. 2015. No. 4. P. 5–8 (in Russian).

19. Boros D. European rye for enhanced food and feed // Conference abstracts: International conference on rye breeding and genetics. Wroclaw, Poland, 2015. P. 56.

20. Urban E.P. Winter rye in Belarus: breeding, seed growing, cultivation technology. Minsk: Belaruskaya nauka, 2009. 269 p (in Russian).

21. Rusakov R.V., Kosolapov V.M. Efficiency of various methods of preparation of winter rye grain in feeding

highly productive cows // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2012. No. 6. P. 61–65 (in Russian).

22. Kosolapov V.M., Kosolapova V.G., Lapteva N.K. Use of winter rye grain in diets of young cattle // Vestnik Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk. 2004. No. 1. P. 30–32 (in Russian).

23. Rusakov R.V., Timkina E.Y., Zhvakina V.M. Method of preparation of rye grain for feeding // Proshloe, nastoyashee i budushchee zootekhnicheskoy nauki: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii k 75-letiyu VMZha, 2004. V. 62. T. 3. P. 373–374 (in Russian).

24. Severov V., Kalashnikov K., Kryukov V. Agroecosis forming under conditions of radionuclide soil contamination // The ecologically safe plant-growing output production. Regional recommendations. Part 2. Pushchino, 1996. P. 15–17.

25. Andreev N.R., Lukin N.D., Papahin A.A. Deep processing of grain of winter rye // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2014. No. 6 (43). P. 9–12 (in Russian).

26. Andreev N.R. Basics of native starch production. Moskva: Pishchepromizdat, 2001. P. 245–268 (in Russian).

27. Andreev N.R., Lukin N.D., Filippova N.I. Rye – raw materials for production of saccharic and protein products // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2008. No. 11. P. 248–253 (in Russian).

28. Roux S., Wortmann H., Schlathölter M. Breeding capability of rye (*Secale cereal* L.) for biogas production // EUCARPIA. International Symposium on rye breeding and genetics. Minsk, Belarus, 2010. P. 85.

29. Hübner M., Wilde P., Oechsner H., Miedaner T. Factors affecting biogas production in winter rye // EUCARPIA. International Symposium on rye breeding and genetics. Minsk, Belarus, 2010. P. 86.

30. Goncharenko A.A. Topical issues of winter rye breeding. Moskva: FGBNU “Rosinformagrotekh”, 2014. 372 p. (in Russian).

Токсин-продуцирующие цианобактерии в озере Байкал и водоёмах Байкальского региона (обзор)

© 2020. О. И. Бельх¹, к. б. н., доцент, зав. лабораторией,
И. В. Тихонова¹, к. б. н., с. н. с., А. В. Кузьмин¹, к. х. н., н. с.,
Е. Г. Сороковикова¹, к. б. н., н. с., С. А. Потапов¹, главный специалист,
А. В. Галкин², к. х. н., директор, Г. А. Федорова^{1,3}, к. х. н., с. н. с.,

¹Лимнологический институт СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 3,

²ООО «Компания Стайлаб»,

123022, Россия, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5,

³Восточно-Сибирский филиал

Российского государственного университета правосудия,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Ивана Франко, д. 23А,

e-mail: belykh@lin.irk.ru

В планктоне водоёмов Байкальского региона и в прибрежной зоне оз. Байкал, начиная с 2005 г., обнаруживаются цианобактерии, содержащие гены синтеза токсинов и способные продуцировать токсины. Генетический анализ показал, что последовательности генов синтеза микроцистинов принадлежат видам родов *Microcystis* и *Dolichospermum*; генов паралитических токсинов моллюсков – представителям родов *Anabaena/Dolichospermum/Aphanizomenon*. Концентрация микроцистинов в воде превышала нормативы для питьевой воды в оз. Котокельское и в Усть-Илимском водохранилище, сакситоксина – в Иркутском водохранилище и в заливе Куркут оз. Байкал. В 2015 г. впервые выявлена продукция токсинов бентосными цианобактериями оз. Байкал, концентрация варьировала в диапазоне 29,8–3050 мкг/кг сухого веса (микроцистины) и 21–29390 мкг/г сухого веса (сакситоксин и его производные). Для оценки реальной угрозы здоровью человека необходима разработка гигиенических нормативов содержания цианотоксинов в воде.

Ключевые слова: озеро Байкал, цианобактерии, цианотоксины, микроцистины, сакситоксин, паралитические токсины моллюсков.

Toxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal and reservoirs of Baikal region (review)

© 2020. O. I. Belykh¹ ORCID: 0000-0002-1188-7351¹

I. V. Tikhonova¹ ORCID: 0000-0002-4323-6799¹, A. V. Kuzmin¹ ORCID: 0000-0002-8114-6479¹

E. G. Sorokovikova¹ ORCID: 0000-0002-1431-6546¹, S. A. Potapov¹ ORCID: 0000-0003-1391-6731¹

A. V. Galkin² ORCID: 0000-0002-7857-7075², G. A. Fedorova^{1,3} ORCID: 0000-0002-1697-8631¹

¹Limnological Institute SB RAS,
3, Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, Russia, 664033,

²Stylab Company,

5, Zvenigorodskoye Shosse, Moscow, Russia, 123022,

³Russian State University of Justice,

23A, Ivana Franko St., Irkutsk, Russia, 664074,

e-mail: belykh@lin.irk.ru

Cyanobacteria containing toxin synthesis genes and capable to produce toxins have been found since 2005 in the plankton of the coastal zone of Lake Baikal and in the water bodies of the Baikal region. Analysis showed that the sequences for microcystin synthesis genes belonged to the genera *Microcystis* and *Dolichospermum*; the sequences for genes encoding paralytic shellfish toxins synthesis – to representatives of the genera cluster *Anabaena/Dolichospermum/Aphanizomenon*. Microcystin concentration in water exceeded the guideline for the drinking water quality in Lake Kotokelskoe and in the Ust-Ilimsk reservoir, as well as concentration of saxitoxin – in the Irkutsk reservoir and in the Kurkut bay of Lake Baikal. In 2015 the cyanotoxins were also recorded in Baikal benthic biofouling, the concentration varied in the range of 29.8–3050 µg/kg dry weight (microcystins) and 21–29390 µg/g dry weight (saxitoxin and its derivatives). Due to the

absence of standards regulating concentration of the cyanotoxins produced by benthic cyanobacteria, it is impossible to estimate real health risks for humans. Situation in some places of Lake Baikal and water bodies needs the state control and management in the issue concerning toxic cyanobacteria.

Keywords: Lake Baikal, cyanobacteria, cyanotoxins, microcystin, saxitoxin, paralytic shellfish toxins.

Цианобактерии – одни из самых древних и успешных микроорганизмов на Земле – широко распространены в водных экосистемах. Они обитают в поверхностном слое и толще воды, на дне водоёмов, формируют биоплёнки на растениях, животных и других объектах от полярных регионов до тропиков [1, 2]. Цианобактерии являются источником разнообразных вторичных метаболитов, в том числе токсинов, которые по химической структуре и направленности действия подразделяются на гепатотоксины (например, микроцистины), цитотоксины (например, цилиндроспермопсины), нейротоксины (например, сакситоксины), дерматотоксины (лингбиатоксины), ирритантные токсины (липополисахариды) и способны вызывать как острые отравления человека и животных, так и хронические заболевания [3, 4].

Самыми опасными среди них являются сакситоксин и его производные, совместно называемые паралитическими токсинами моллюсков (PST). Сакситоксин обладает нейротоксическим действием, блокирует поры натриевых каналов мембран нервных и мышечных клеток и вызывает паралич мышц, в том числе дыхательной мускулатуры; ЛД₅₀ для человека при пероральном введении составляет 5,7 мкг/кг; токсин может проникать в организм через открытые раны, причём смертельная доза составляет всего 0,05 мг/чел. [5].

Микроцистины (МС) – наиболее распространённые цианотоксины в пресных водах. МС представляют собой циклические гептапептиды, которые ингибируют активность ферментов в гепатоцитах. Высокие дозы МС вызывают обширные кровоизлияния в печени, низкие дозы при длительном воздействии приводят к злокачественным образованиям [6–8]. Наибольшую опасность токсины представляют при массовом развитии цианобактерий – вследствие разрушения клеточной стенки при их массовой гибели и переходе внутриклеточных токсинов в воду [9]. В силу этого Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) установлена предельно допустимая концентрация (ПДК) для микроцистинов в пересчёте на наиболее распространённый и токсичный МС-LR в питьевой воде на уровне не более 1 мкг/л [10].

Байкал – крупнейшее озеро мира, природный резервуар чистой пресной воды. В нём сосредоточено более 80% пресных вод России и около 20% мировых запасов. Комплексные исследования токсин-продуцирующих цианобактерий в Байкальском регионе впервые начаты нами в 2005 г. Цель данного обзора – представить результаты исследований потенциально токсичных цианобактерий озера Байкал и водоёмов региона за период 2005–2019 гг.

Методы исследования потенциально токсичных цианобактерий и цианотоксинов

Видовой состав цианобактерий определяли с помощью световой микроскопии согласно определителям [11–13]. Для идентификации цианобактерий, содержащих гены синтеза МС, использовали праймеры, детектирующие кластер генов, кодирующих микроцистин-синтетазу (*mcy*) [14, 15]. Гены, ответственные за синтез PST, выявляли с помощью праймеров, специфичных к поликетидсинтазе, входящей в состав мультиферментного комплекса *sxt* [16]. Концентрацию цианотоксинов в воде и биомассе определяли методами иммуноферментного анализа (ИФА) с использованием наборов Abraxis Microcystins-ADDA (Abraxis LLC, США) и Abraxis Saxitoxin (Abraxis LLC, США) в аккредитованной лаборатории (ООО «Компания Стайлаб»), а также жидкостной хроматомасс-спектрометрии (ЖХ-МС). Идентификацию вариантов цианотоксинов выполняли на тандемном времяпролётном масс-спектрометре (UltraflexBrukerDaltoniks, Германия) с матричной лазерной десорбцией/ионизацией (MALDI-TOF/TOF).

Токсин-продуцирующие цианобактерии в планктоне

В водохранилищах ангарского каскада (Иркутское, Братское, Усть-Илимское, Богучанское) токсичные цианобактерии впервые выявлены в Усть-Илимском водохранилище в 2005 г. В последующие годы в Иркутском, Братском и Усть-Илимском водохранилищах регулярно обнаруживали токсичные циано-

бактерии. В Богучанском водохранилище, заполнение которого было завершено в 2015 г., продуценты микроцистина и сакситоксина были обнаружены в 2016 г. [17]. В планктоне водохранилищ были выявлены потенциально-токсичные виды цианобактерий: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Dolichospermum lemmermannii*, *D. flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *M. pulvereae*.

Концентрация МС, измеренная методом ИФА летом 2010 г. в воде Усть-Илимского водохранилища, была ниже пороговой и составила 0,25 мкг/л [18]. Концентрация PST в воде Усть-Илимского водохранилища составила 1,37 мкг/л, в воде Иркутского и Братского водохранилищ PST не были обнаружены [19]. В недавно наполненном Богучанском водохранилище концентрация МС в воде в 2016 г. по данным ИФА достигала 0,3 мкг/л [17], что всего в 3 раза ниже ПДК для микроцистинов в питьевой воде, рекомендованной ВОЗ [10].

В Иркутском водохранилище в примыкающей к плотине застойной зоне в конце августа – начале сентября 2017 г. сформировалось пятно загрязнённой поверхностной воды из полурасложившейся биомассы *Dolichospermum lemmermannii*. В собранной с поверхности пятна биомассе и в отфильтрованной воде был обнаружен сакситоксин.

Содержание сакситоксина в воде составило 600 ± 100 мкг/л по данным ВЭЖХ-МС, по результатам ИФА суммарное содержание PST достигало 2900 ± 900 мкг/л, что в 200 и 1000 раз выше ПДК для водоёмов питьевого назначения [20].

Несмотря на высокую токсичность PST, до сих пор не установлено нормативов их ПДК в воде, рекомендованных ВОЗ. В странах, где часты пресноводные PST-цветения, введены региональные нормативы – в Австралии, Бразилии и Новой Зеландии ПДК для сакситоксина в питьевой воде составляет 3 мкг/л [21].

Анализ планктонных проб оз. Котокельское, расположенного в двух километрах от восточного берега оз. Байкал и связанного с ним посредством рек, показал наличие видов рода *Microcystis*, способных синтезировать МС. Содержание микроцистинов в фитопланктоне составило 53 мкг/г сухого веса (с. в.), соотношение вариантов токсинов было следующим: МС-RR – 49%, МС-LR – 42,5%, МС-ΥR – 8,5%, в воде концентрация МС достигала 13,8–76,0 мкг/л по данным ИФА. Летом 2008 г. на озере зарегистрирована массовая гибель рыб, водоплавающих птиц и домашних животных, отмечено 16 случаев отравлений человека.

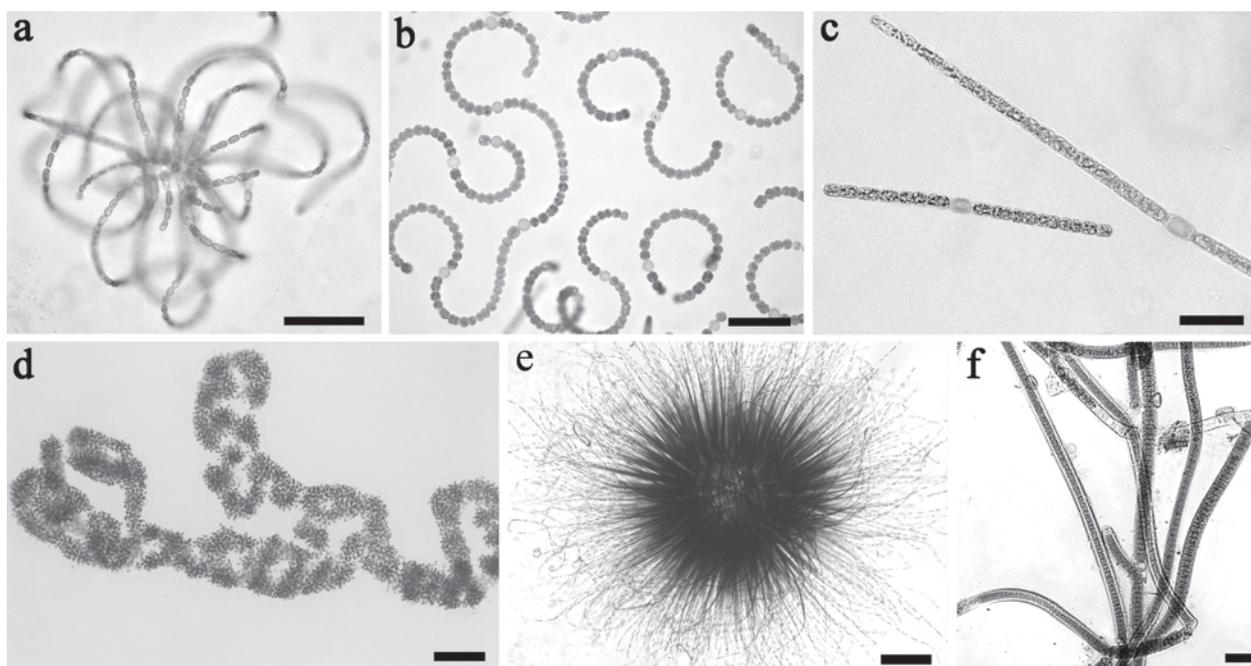


Рис. Потенциально токсичные цианобактерии оз. Байкал: а – *Dolichospermum lemmermannii*, б – *Dolichospermum spiroides*, с – *Aphanizomenon flos-aquae*, д – *Microcystis aeruginosa*, е – *Gloeotrichia echinulata*, ф – *Tolypothrix distorta*. Масштаб: а – 50 мкм; б, д, е – 100 мкм; с, ф – 20 мкм
Fig. Potentially toxic cyanobacteria of Lake Baikal: а – *Dolichospermum lemmermannii*, б – *Dolichospermum spiroides*, с – *Aphanizomenon flos-aquae*, д – *Microcystis aeruginosa*, е – *Gloeotrichia echinulata*, ф – *Tolypothrix distorta*. Scale bar: а – 50 μm; б, д, е – 100 μm; с, ф – 20 μm

В оз. Байкал MC- и PST-продуцирующие цианобактерии выявляются с 2010 г. в планктоне прибрежной зоны около пос. Турка, в проливах Малое Море и Ольхонские Ворота, в Баргузинском и Чивыркуйском заливах. В планктоне этих районов выявлены *Aphanizomenon flos-aquae*, *Dolichospermum flos-aquae*, *D. lemmermannii*, *D. macrosporum*, *D. solitarium*, *D. mucosum*, *D. planctonicum*, *D. smithii*, *Gloeostrichia echinulata*, *Merismopedia* sp., *Microcystis* sp., *M. aeruginosa*, *Chamaesiphon* sp., *Phormidium* sp., *Tolypothrix* sp. (рис., а–d). На глубоководных станциях доминирующими фило типами были пикопланктонные представители кластера *Synechococcus/Cyanobium*, среди нанопланктонных цианобактерий отмечены *Aphanizomenon flos-aquae*, *Dolichospermum flos-aquae*, *D. lemmermannii*. Согласно результатам генетического анализа продуцентами MC среди планктонных цианобактерий являлись виды родов *Microcystis* и *Dolichospermum*; сакситоксина – представители кластера родов *Anabaena/Dolichospermum/Aphanizomenon* [18, 22, 23].

Концентрация MC в воде исследуемых районов достигала $0,17 \pm 0,01$ мкг/л, что значительно ниже пороговых значений для питьевой воды. В фитопланктоне она изменялась от 0,052 до 1930 мкг/г с. в., при этом максимальные значения наблюдали в 2017 г. в проливе Малое Море при цветении *G. echinulata* (рис., е) [23]. Содержание PST в воде прибрежной зоны значительно варьировало – от $1,93 \pm 0,64$ мкг/л в заливе Турка до $7,23 \pm 0,5$ мкг/л в заливе Куркут пролива Малое Море, в последнем полученные показатели превышали ПДК для сакситоксина в питьевой воде [18, 22, 23]. В течение многолетнего мониторинга цианотоксинов в озере Байкал, в пелагиали озера MC и PST не были обнаружены.

Загрязнение поверхностных вод цианотоксинами наблюдается и в других крупных озёрах мира. Например, концентрация MC в отдельных образцах озера Мичиган в 2017 г. достигала $3,0 \pm 2,3$ мкг/л [24]. В озере Эри, в большей степени, чем другие Великие озёра, подверженного «цветениям» цианобактерий, концентрация MC в воде значительно различается для пелагических станций (1–3 мкг/л) и прибрежных зон (570–3144 мкг/л) [25]. Концентрация MC в образцах воды заливов озера Виктория (Кения), варьирует от незначительных (0,4 мкг/л) до превышающих нормативы (13 мкг/л) [26, 27]. MC- и PST-продуцирующие цианобактерии выявлены в озере Виннипег

(Канада) с помощью специфических праймеров к генам синтеза токсинов, при этом в воде обнаружено только присутствие микроцистинов в концентрации от 0,07 до 9,21 мкг/л [28]. Таким образом, появление сакситоксина возможно при изменении экологических параметров системы. В озере Окичоби (Флорида, США) также присутствовали виды цианобактерий, содержащие кластер генов синтеза паралитических токсинов, но концентрация PST была на уровне предела обнаружения [29]. В озере Кабетогамма (Миннесота, США) сакситоксин найден в летних планктонных пробах в невысокой концентрации 0,08 мкг/л [30]. В Южной Америке PST отмечены в планктоне нескольких мелких водоёмов, являющихся источниками питьевой воды [31]. В целом, контаминация верхних слоёв воды пресных озёр сакситоксином и его аналогами встречается реже, чем микроцистинами.

Токсин-продуцирующие цианобактерии в бентосе озера Байкал

Начиная с 2011 г. в литоральной зоне озера Байкал зарегистрирован крупномасштабный экологический кризис, основной чертой которого явилось заболевание губок, перешедшее в их массовое вымирание. На больных и погибших губках, на камнях и на различных субстратах в большом количестве стали развиваться нитчатые цианобактерии [32, 33].

Микроскопический и генетический анализ обрастаний, отобранных в 2014–2017 гг. с различных субстратов, выявил массовое развитие бентосных цианобактерий с доминированием видов *Symplocastrum* sp., *Tychonema* sp., *Tolypothrix distorta*, *Pseudanabaena* spp., *Oscillatoria curviceps*, *Kamptonema formosum*, *Leptolyngbya* spp. (рис., f). При этом некоторые виды ранее не наблюдали в оз. Байкал. С помощью генетических маркеров в обрастаниях различных субстратов, включая губки, были выявлены цианобактерии, содержащие гены синтеза MC и PST [32, 33].

Максимальное содержание MC в биоплёнках обнаружено в 2017 г. – 1165 мкг/г с. в., в 2015 г. оно было ниже и составляло 0,3–2,5 мкг/г с. в. [32]. Содержание PST в биоплёнках в исследуемый период изменялось от минимальных 0,21 мкг/г с. в. до максимальных значений 35720 мкг/г с. в. (табл.). Высокая концентрация цианотоксинов обнаружена в обрастаниях ветвистых губок и камней [33]. В колониях *Nostoc pruniforme*, распространённого в прибрежной зоне пролива Малое море, Баргузинского залива и других участков озера Байкал, обнаружен сакситоксин [34]. Сле-

Таблица / Table

Содержание токсинов цианобактерий в планктоне и бентосе озера Байкал в 2016–2017 гг.
The content of cyanobacteria toxins in plankton and benthos of Lake Baikal in 2016–2017

Тип пробы, место отбора Sample type, sampling location	Микроцистин Microcystin	Сакситоксин Saxitoxin
Вода, залив Мухор Water, Mukhor bay	0,97–1200 нг/л / ng/L	Н.о. / N.d.
Вода, Посольский сор Water, Posolsky Sor	Н.о. / N.d.	15 нг/л / ng/L
Биоплёнки, Листвянка Biofouling, Listvyanka	0,3–2,35 нг/мг / ng/mg	8,3–42,6 нг/мг / ng/mg
Биоплёнки, Большие Коты Biofouling, Bolshiye Koty	0,066–1165 нг/мг / ng/mg	0,378–123,3 нг/мг / ng/mg
Детрит, Большое Голоустное Detritus, Bol'shoe Goloustnoe	68 нг/мг / ng/mg	Н.о. / N.d.
Биоплёнки, Ольхонские Ворота Biofouling, Olkhonskie Vorota strait	29–448 нг/мг / ng/mg	Н.о. / N.d.
Биоплёнки, мыс Толстый Biofouling, Cape Tolstiy	Н.о. / N.d.	15,0–158,6 нг/мг / ng/mg
Биоплёнки, бухта Ая Biofouling, Aya Bay	20–40 нг/мг / ng/mg	116,8–3572 нг/мг / ng/mg
Природная колония <i>Nostoc pruniforme</i> Natural colony of <i>Nostoc pruniforme</i>	0,422–27 нг/мг / ng/mg	3,8–54,2 нг/мг / ng/mg
Природная колония <i>Tolypothrix distorta</i> Natural colony of <i>Tolypothrix distorta</i>	135 нг/мг / ng/mg	0,9 нг/мг / ng/mg

Примечание / Note: Н.о. / N.d. – не определяли / Not determined.

дует отметить ежегодный тренд повышения содержания цианотоксинов в обрастаниях субстратов.

При сравнении содержания токсинов цианобактерий в бентосе озера Байкал с другими водоёмами мира, следует отметить, что более высокая концентрация PST характерна для полярных экосистем и озёр Новой Зеландии [35, 36]. В Новой Зеландии продуцентом PST была *Scytonema crispum*, которая является близким родственником байкальского продуцента сакситоксина *T. distorta*. В Арктике продуцентом PST была определена осцилляториевая цианобактерия *Lyngbya wollei*, не встречающаяся в нашем регионе. Микроцистины, чаще чем PST, детектируются в биомассе бентосных проб озера Байкал. Это согласуется с общей тенденцией в мире, что наиболее встречаемыми токсинами бентосных цианобактерий являются микроцистин и анатоксин [37]. Концентрации микроцистина в обрастаниях различных субстратов озера Байкал вполне сопоставимы с таковыми в цианобактериальных матах Арктики и Антарктиды и ниже, чем в бентосных цианобактериях реки Нил [35–38].

Исследование экстрактов проб планктонных и бентосных цианобактерий, обитающих в озере Байкал, водохранилищах

ангарского каскада, озере Котокельское методом MALDI-TOF/TOF показало наличие более 15 вариантов MC и 10 вариантов PST. Цианобактерии, продуцирующие эти токсины, развиваются в водоёмах, которые по ряду показателей характеризуются как мезотрофные с наличием эвтрофных участков и очевидно, что планктонные цианобактериальные «цветения» являются характерным следствием эвтрофирования [39]. Вместе с тем, причины увеличения частоты и распространённости цианобактерий в бентосе по всей литоральной зоне озера Байкал до конца не ясны. Бентосные цианобактерии в озере Байкал интенсивно осваивают новые местообитания, в том числе и биогенные субстраты, их биомасса многократно увеличилась, однако в настоящий период трофический статус озера в целом не изменился и соответствует олиготрофному по гидрохимическим показателям [40]. Массовое развитие токсин-продуцирующих цианобактерий, представляющих угрозу для здоровья человека и животных, требует пристального внимания, как со стороны учёных, так и государственных органов и указывает на необходимость мониторинга содержания цианотоксинов в воде, особенно в туристско-рекреационных зонах с интенсивной антропогенной нагрузкой.

Данные получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Ультрамикроанализ» Лимнологического института СО РАН. Работа выполнена в рамках государственного задания № 0345-2019-0003.

References

- Greer B., Maul R., Campbell K., Elliott C. Detection of freshwater cyanotoxins and measurement of masked microcystins in tilapia from Southeast Asian aquaculture farms // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2017. V. 409. P. 1–13. doi: 10.1007/s00216-017-0352-4
- Kleinteich J., Wood S.A., Puddick J., Schleheck D., Küpper F.C., Dietrich D. Potent toxins in Arctic environments: Presence of saxitoxins and an unusual microcystin variant in Arctic freshwater ecosystems // *Chemico-Biological Interactions*. 2013. V. 206. P. 423–431. doi: 10.1016/j.cbi.2013.04.011
- Griffiths D.J., Saker M.L. The Palm Island mystery disease 20 years on: a review of research on the cyanotoxin cylindrospermopsin // *Environmental Toxicology*. 2003. V. 18. P. 78–93. doi: 10.1002/tox.10103
- Testai E., Buratti F.M., Funari E., Manganelli M., Vichi S., Arnich N., Biré R., Fessard V., Sialehaamo A. Review and analysis of occurrence, exposure and toxicity of cyanobacteria toxins in food // *EFSA Supporting Publications*. 2016. V. 13. doi: 10.2903/sp.efsa.2016.EN-998
- Patocka J., Streda L. Brief review of natural non-protein neurotoxins // *ASA newsletter*. 2002. V. 02–2. No. 89. P. 16–24.
- Svircev Z., Krstic S., Miladinov-Mikov M., Baltic V., Vidovic M. Freshwater cyanobacterial blooms and primary liver cancer epidemiological studies in Serbia // *Journal of Environmental Science and Health*. 2009. V. 27. P. 36–55. doi: 10.1080/10590500802668016
- Zhou L., Yu H., Chen K. Relationship between microcystin in drinking water and colorectal cancer // *Biomedical and Environmental Sciences*. 2002. V. 15. P. 166–171.
- Drobac D., Tokodi N., Simeunovic J., Baltic V., Stanic D., Svircev Z. Human exposure to cyanotoxins and their effects on health // *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2013. V. 64. P. 305–315. doi: 10.2478/10004-1254-64-2013-2320
- Davis T.W., Gobler C.J. Preface for Special Issue on “Global expansion of harmful cyanobacterial blooms: Diversity, ecology, causes, and controls” // *Harmful Algae*. 2016. V. 54. P. 1–3. doi: 10.1007/s00248-012-0159-y
- World Health Organization: Guidelines for drinking-water quality. Health criteria and other supporting information. Geneva: World Health Organization, 1998. 273 p.
- Komárek J. Cyanoprokaryota. 3. Teil / 3rd part: Heterocytous Genera // *Süßwasserflora von Mitteleuropa* / Eds. B. Büdel, G. Gärtner, L. Krienitz. Springer Spektrum, 2013. 1130 p.
- Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota – 1. Teil: Chroococcales // *Süßwasserflora von Mitteleuropa* / Eds. H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer. Band 19/1. Gustav Fischer Verlag, 1999. 548 p.
- Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota – 2. Teil: Oscillatoriales // *Süßwasserflora von Mitteleuropa* / Eds. B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner, M. Schagerl. Band 19/2. Heidelberg: Elsevier/Spektrum, 2005. 759 p.
- Jungblut A.D., Neilan B.A. Molecular identification and evolution of the cyclic peptide hepatotoxins, microcystin and nodularin, synthetase genes in three orders of cyanobacteria // *Archives of Microbiology*. 2006. V. 185. P. 107–114. doi: 10.1007/s00203-005-0073-5
- Rantala A., Fewer D., Hisbergues M., Rouhiainen L., Vaitomaa J., Börner T., Sivonen K. Phylogenetic evidence for the early evolution of microcystin synthesis // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004. V. 101. P. 568–573. doi: 10.1073/pnas.0304489101
- Ballot A., Fastner J., Wiedner C. Paralytic shellfish poisoning toxin-producing cyanobacterium *Aphanizomenon gracile* in northeast Germany // *Applied and Environmental Microbiology*. 2010. V. 76. P. 1173–1180. doi: 10.1128/AEM.02285-09
- Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Podlesnaya G.V., Belykh O.I. Evaluation and prediction of toxic cyanobacterial blooming in phytoplankton of the Boguchany Reservoir // *Water and Ecology*. 2019. V. 77. No. 1. P. 86–93 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.86-93
- Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Potapov S.A., Fedorova G.A. Microcystin-producing cyanobacteria in reservoirs of Russia, Belarus, and Ukraine // *Chemistry for Sustainable Development*. 2013. V. 21. P. 347–361.
- Belykh O.I., Gladkikh A.S., Tikhonova I.V., Kuz'min A.V., Mogil'nikova T.A., Fedorova G.A., Sorokovikova E.G. Identification of cyanobacterial producers of shellfish paralytic toxins in lake Baikal and reservoirs of the Angara river // *Microbiology*. 2015. V. 84. P. 98–99. doi: 10.1134/S0026261715010038
- Grachev M., Zubkov I., Tikhonova I., Ivacheva M., Kuzmin A., Sukhanova E., Sorokovikova E., Fedorova G., Galkin A., Suslova M., Netsvetaeva O., Eletskaia E., Pogodaeva T., Smirnov V., Ivanov A., Shagun V., Minaev V., Belykh O. Extensive contamination of water with saxitoxin near the dam of the Irkutsk Hydropower Station Reservoir (East Siberia, Russia) // *Toxins*. 2018. V. 10. No. 402. P. 1–12. doi: 10.3390/toxins10100402
- Chorus I. Current approaches to cyanotoxin risk assessment, risk management and regulations in different countries. Dessau-Roßlau, Germany: Federal Environment Agency, 2012. 147 p.
- Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Potapov S.A., Butina T.V. Saxitoxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal // *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. V. 8. No. 2. P. 186–192. doi: 10.1134/S199542551502002X

23. Shtykova Y.R., Drucker V.V., Sorokovikova E.G., Zhuchenko N.A., Zimens E.A., Belykh O.I. Sanitary-microbiological and toxicological monitoring of Lake Baikal. Part 1: Water area of the Maloe More in 2016 // *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*. 2018. No. 11 (31). P. 110–114 (in Russian). doi: 10.33075/2220-5861-2018-1-110-114
24. Bartlett S.L., Brunner S.L., Klump J.V., Houghton E.M., Miller T.R. Spatial analysis of toxic or otherwise bioactive cyanobacterial peptides in Green Bay, Lake Michigan // *Journal of Great Lakes Research*. 2018. V. 44. P. 924–933. doi: 10.1016/j.jglr.2018.08.016
25. Miller T., Beversdorf L., Weirich C., Bartlett S. Cyanobacterial toxins of the Laurentian Great Lakes, their toxicological effects, and numerical limits in drinking water // *Marine Drugs*. 2017. V. 15. P. 160. doi: 10.3390/md15060160
26. Mbonde A., Sitoki L., Kurmayer R. Phytoplankton composition and microcystin concentrations in open and closed bays of Lake Victoria, Tanzania // *Aquatic Ecosystems Health and Management*. 2015. V. 18. P. 212–220. doi: 10.1080/14634988.2015.1011030
27. Simiyu B., Oduor S., Rohrlack T., Sitoki L., Kurmayer R. Microcystin content in phytoplankton and in small fish from eutrophic Nyanza Gulf, Lake Victoria, Kenya // *Toxins*. 2018. V. 10. P. 275. doi: 10.3390/toxins10070275
28. McKindles K.M., Zimba P.V., Chiu A.S., Watson S.B., Gutierrez D.B., Westrick J., Kling H., Davis T.W. A multiplex analysis of potentially toxic cyanobacteria in Lake Winnipeg during the 2013 bloom season // *Toxins*. 2019. V. 11. P. 587. doi: 10.3390/toxins11100587
29. Kramer B.J., Davis T.W., Meyer K.A., Rosen B.H., Goleski J.A., Dick G.J., Oh G., Gobler C.J. Nitrogen limitation, toxin synthesis potential, and toxicity of cyanobacterial populations in Lake Okechobee and the St. Lucie River Estuary, Florida, during the 2016 state of emergency event // *PLoS ONE*. 2018. V. 13. P. e0196278. doi: 10.1371/journal.pone.0196278
30. Christensen V.G., Maki R.P., Stelzer E.A., Norland J.E., Eakalak E. Phytoplankton community and algal toxicity at a recurring bloom in Sullivan Bay, Kabetogama Lake, Minnesota, USA // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. P. 16129. doi: 10.1038/s41598-019-52639-y
31. Barros M., Wilson A., Leitão J., Pereira S., Buley R., Fernandez-Figueroa E., Capelo-Neto J. Environmental factors associated with toxic cyanobacterial blooms across 20 drinking water reservoirs in a semi-arid region of Brazil // *Harmful Algae*. 2019. V. 86. P. 128–137. doi: 10.1016/j.hal.2019.05.006
32. Belykh O.I., Fedorova G.A., Kuzmin A.V., Tikhonova I.V., Timoshkin O.A., Sorokovikova E.G. Microcystins in cyanobacterial biofilms from the littoral zone of Lake Baikal // *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2017. V. 72. P. 225–231. doi: 10.3103/S0096392517040022
33. Belykh O.I., Tikhonova I.V., Kuzmin A.V., Sorokovikova E.G., Fedorova G.A., Khanaev I.V., Sherbakova T.A., Timoshkin O.A. First detection of benthic cyanobacteria in Lake Baikal producing paralytic shellfish toxins // *Toxicon*. 2016. No. 121. P. 36–40. doi: 10.1016/j.toxicon.2016.08.015
34. Zubkov I.N., Kuzmin A.V., Tikhonova I.V., Belykh O.I., Smirnov V.I., Ivanov A.V., Shagun V.A., Grachev M.A., Fedorova G.A. A method for determination of saxitoxins using HPLC-MS with precolumn derivatization with 2,4-dinitrophenylhydrazine // *Proceedings of Universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2018. V. 8. P. 25–32. doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-3-25-32
35. Kleinteich J., Wood S., Puddick J., Schleheck D., Küpper F., Daniel D. Potent toxins in Arctic environments – presence of saxitoxins and an unusual microcystin variant in Arctic freshwater ecosystems // *Chemico-biological interactions*. 2013. V. 206. P. 423–431. doi: 10.1016/j.cbi.2013.04.011
36. Smith F.M.J., Wood S.A., Wilks T., Kelly D., Broady P.A., Williamson W., Gaw S. Survey of *Scytonema* (Cyanobacteria) and associated saxitoxins in the littoral zone of recreational lakes in Canterbury (New Zealand) // *Phycologia*. 2012. V. 51. P. 542–551. doi: 10.2216/11-84.1
37. Quiblier C., Wood S., Echenique-Subiabre I., Heath M., Villeneuve A., Humbert J.-F. A review of current knowledge on toxic benthic freshwater cyanobacteria – ecology, toxin production and risk management // *Water Research*. 2013. V. 47. P. 5464–5479. doi: 10.1016/j.watres.2013.06.042
38. Wood S.A., Mountfort D., Selwood A.I., Holland P.T., Puddick J., Cary S.C. Widespread distribution and identification of eight novel microcystins in Antarctic cyanobacterial mats // *Applied and Environmental Microbiology*. 2008. V. 74. P. 7243–7251. doi: 10.1128/AEM.01243-08
39. Ashikhmina T.Ya., Kut'yavina T.I., Domnina E.A. Studying the processes of natural and man-made reservoirs eutrophication (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 3. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-006-013
40. Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water // *Inland Waters*. 2017. V. 7. P. 250–258. doi: 10.1080/20442041.2017.1329982

Ресурсный подход к оценке загрязнения почв тяжёлыми металлами и изучению ёмкости геохимических барьеров на примере города Курска

© 2020. Н. П. Неведров¹, к. б. н., м. н. с.,
 Е. П. Проценко¹, д. с.-х. н., г. н. с., И. П. Балабина¹, к. б. н., декан,
 Б. И. Кочуров², д. г. н., профессор, в. н. с., Е. В. Куликова³, к. б. н., с. н. с.,
¹Курский государственный университет,
 305000, Россия, г. Курск, ул. Радищева, д. 33,
²Институт географии РАН,
 107014, Россия, г. Москва, ул. Стромынка, д. 9,
³Институт экспериментальной ботаники
 имени В. Ф. Купревича национальной академии наук Беларуси,
 220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, д. 27,
 e-mail: 9202635354@mail.ru, protselena@yandex.ru, balabinaegf@yandex.ru,
 camertonmagazin@mail.ru, kulikova22@mail.ru

В статье приведены результаты оценки экологического состояния почв г. Курска с применением ресурсного подхода. Для расчётов условных нормативов запасов тяжёлых металлов (ТМ) в почвах и комплексной оценки экологического состояния почвенного покрова, предложено учитывать региональные особенности физико-химических свойств почв и применять авторский региональный норматив запасов ТМ. Определены запасы ТМ и характер их профильного распределения для нескольких типов почв (урбанозёмы собственно, урботёмно-серые почвы, тёмно-серые почвы, алювиально-пойменные почвы, подзолы песчаные), испытывающих антропогенную нагрузку различного уровня и характера. Выявлено, что почвы города имеют как поверхностное, так и глубокопрофильное загрязнение. Наиболее загрязнёнными с глубоко сосредоточенными запасами ТМ почвами оказались урбанозёмы промышленных зон. Установлено, что приоритетными загрязняющими элементами среди ТМ являются Pb, Cd и Zn. Их запасы превышают предложенный региональный условный норматив ПДК в 5,9; 29,0 и 1,1 раза соответственно. Ресурсный подход позволил оценить потенциал и насыщенность геохимических барьеров почв Курска. Отмечена высокая ёмкость гумусового геохимического барьера, позволяющего депонировать большую часть ТМ в гумусово-аккумулятивных горизонтах алювиально-пойменных и урботёмно-серых почв.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, запасы тяжёлых металлов, ресурсный подход, оценка почв, профильное распределение.

Resource approach to assessment of heavy metal pollution of soils and studying the capacity of geochemical barriers on the example of Kursk City

© 2020. N. P. Nevedrov¹ ORCID: 0000-0003-1121-0671^{*}
 E. P. Protsenko¹ ORCID: 0000-0002-9207-1548^{*}, I. P. Balabina¹ ORCID: 0000-0002-4771-2983^{*}
 B. I. Kochurov² ORCID: 0000-0002-8351-3658^{*}, E. V. Kulikova³ ORCID: 0000-0003-0158-512X^{*}
¹Kursk State University,
 33, Radishcheva St., Kursk, Russia, 305000,
²Institute of geography Russian Academy of Sciences,
 9, Stromynka, Moscow, Russia, 107014,
³V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany
 of the National Academy of Sciences of Belarus,
 27, Akademicheskaya St., Minsk, Republic of Belarus, 220072,
 e-mail: 9202635354@mail.ru, protselena@yandex.ru, balabinaegf@yandex.ru,
 camertonmagazin@mail.ru, kulikova22@mail.ru

The results of ecological assessment of Kursk soils condition with the use of the resource approach are presented in the article. For calculating the conditional standards of heavy metals (HM) reserves in soils and a comprehensive assessment of the ecological state of the soil cover, it was proposed to take into account regional peculiarities of the physicochemical properties of the soil and apply the author's regional HM standard. The reserves of accommodation of heavy metals and the nature of their profile distribution in several types of soils (Urbanozems, Urban dark-gray soils, dark gray soils, alluvial plain soils, sandy podzols) with anthropogenic load of various levels and character are determined. It is revealed that the soil of the city has both superficial and deep-profile pollution. The most polluted soils with deeply concentrated reserves of HM turned out to be Urbanozems industrial zones. It is noted that Pb, Cd and Zn are the main pollutants among HM. Their reserves exceed the proposed regional conditional MPC 5.9, 29.0 and 1.1 times, respectively. The resource approach allowed us to estimate the potential and saturation of the geochemical barriers of Kursk soils. A high capacity of the humus geochemical barrier is noted, which allows depositing most of the HM in the humus-accumulative horizons of the Alluvial gleyic soils and Urban dark-gray soils.

Keywords: heavy metals, heavy metal reserves, resource approach, soil assessment, profile distribution.

Загрязнение почв городских территорий тяжёлыми металлами (ТМ) имеет особую актуальность [1, 2]. В работах современных исследователей отмечается тенденция к постоянному росту содержания ТМ в почвах городов. Огромный вклад в рост содержания ТМ в компонентах окружающей среды города вносят автотранспорт и промышленность [3–6].

Курск относится к городам с развитым промышленным комплексом (машиностроение, производство электрооборудования, химическое производство и производство резиновых и пластмассовых изделий), а также с интенсивной транспортной сетью [7]. Наиболее часто превышающими предельно допустимые концентрации (ПДК) элементами в почвах г. Курска являются Pb, Cd и Zn [2, 7]. Высокие концентрации ТМ в гумусово-аккумулятивных горизонтах почв наблюдаются практически повсеместно, но также встречаются участки с глубоко загрязнёнными почвами [2]. Вопрос нормирования загрязнения глубокозалегающих минеральных горизонтов почв пока остаётся нерешённым.

Способность городских экосистем удерживать поллютанты, в том числе и ТМ, и препятствовать их миграции в сопредельные среды также во многом зависит от ёмкости, потенциала и степени нарушенности геохимических барьеров. Использование только концентрационных стандартов для оценки качества почв отражает не полную картину экологической обстановки [8, 9]. Более объективную оценку экологического состояния почв и её способности к поддержанию экосистемного баланса можно получить при расчёте запасов ТМ [8, 9] в метровой толще почвенного покрова и прогнозе функционирования биологических, физико-химических и механических барьеров латеральной и вертикальной миграции ТМ.

Целью работы являлось изучение возможности применения ресурсного подхода для

оценки степени загрязнения почв г. Курска ТМ и выявления экологического потенциала геохимических барьеров.

Объекты и методы

Исследовали почвы представительных катен г. Курска. Выбор ключевых участков был обоснован несколькими критериями: почвенным, геоморфологическим, урбоэкологическим и биоценоотическим. Было исследовано 12 участков, расположенных в южной и северной части г. Курска, имеющих разную по интенсивности антропогенную нагрузку (промышленные, жилые, рекреационные, санитарно-защитные зоны города). Ключевые участки функционировали на 4 типах антропогенно-трансформированных почв, что позволило оценить влияние базовых свойств почв на особенности распределения запасов ТМ в почвенных профилях.

Отбор проб почв производили по ГОСТ 28168-89, из каждого генетического горизонта, в скважинах пробы отбирали через каждые 30 см с учётом мощности горизонтов в описанных разрезах до глубины 100 см.

Диагностику и классификацию проводили в соответствии с современными представлениями о классификации городских почв [10, 11]. Определение физических и химических свойств почв проводили по стандартным методикам: pH_{KCl} (ГОСТ 26483-85), содержание гумуса (по Тюрину ГОСТ 26213-91), количество поглощённых оснований (ГОСТ 27821-88), гранулометрический состав (по Качинскому), плотность сложения (метод режущего кольца ГОСТ 5180-84). Определение валовых (ВФ) и подвижных форм (ПФ) ТМ (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Co, Mn) методом атомно-адсорбционной спектроскопии на анализаторе «Спектр-5» (РД 52.18.289-90, РД 52.18.191-89, ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002). Статистическую обработку данных производили средствами

пакета STATGRAPHICS Plus for Windows 2.1. и пакета Microsoft Office Excel.

При определении загрязнения почв ТМ использовали значения ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) и предельного допустимого превышения (ПДП) [12, 13], регионального фона для чернозёмов [14] и фоновых концентраций для отдельных типов почв [1]. С целью наиболее точного отражения сложившейся экологической ситуации применяли ресурсный подход [9]. Полученные данные запасов ТМ в метровой толще почвы были сопоставлены с условно-нормативными величинами запаса ТМ (ПДК г/м²), которые были получены путем пересчёта общепринятых ПДК и ОДК в единицу измерения г/м² [9]. Расчёт условных нормативов ПДК производили по формуле:

$$\text{ПДК (г/м}^2\text{)} = \text{ПДК (мг/кг)} \cdot \rho \text{ (кг/м)} \cdot h \text{ (м)},$$

где для пересчёта используется средняя плотность (ρ) минеральных почв в метровой толще (h) – 1,5 г/см³ (или 1500 кг/м³).

В исследованных почвенных разрезах на территории г. Курска плотность крайне редко достигает значения 1,5 г/см³. Например, средняя плотность гумусово-аккумулятивных горизонтов почв города колеблется в пределах от 1,05 до 1,21 г/см³. Поэтому в данной работе для расчётов условных нормативов запасов ТМ (ПДК) в почвах и комплексной оценки экологического состояния почвенного покрова, нами предлагается учитывать региональные особенности физико-химических свойств почв. Считаем, что необходимо использовать среднюю плотность каждого отдельного горизонта почв, полученную на основе реальных данных плотности сложения почв изученных участков. Для оценки профильного загрязнения почв вводится авторский региональный условный норматив запаса ТМ в метровой толще почв. Такой подход также позволит оценить потенциал геохимических барьеров и их способность к поддержанию экологического баланса на территории г. Курска.

Результаты и обсуждение

Для интерпретации полученных данных о запасах ТМ все изученные участки были объединены в четыре группировки, схожие по типу почв и мощности антропогенного воздействия (табл.).

Выявленные минимальные и максимальные значения запасов меди в почвах иссле-

дованных ключевых участков не превышают условного норматива [9] и регионального условного норматива, предложенного нами, учитывающего особенности почв. Максимальное значение запаса меди (28,3 г/м²) отмечено в селитебной зоне с урботёмно-серыми среднесуглинистыми почвами (табл.). На этом же участке (группировка № 4) верхний предел запасов цинка превышает региональный норматив в 1,1 раза. В остальных случаях превышений условных нормативов по запасам Zn не обнаружено.

Марганец по количеству запаса в метровой толще почв не превышает используемых условных нормативов. Максимальное количество запаса (833,2 г/м²) характерно для аллювиально-пойменных среднесуглинистых почв селитебной зоны. Аналогичная ситуация отмечена и для кобальта – превышения нормативов не обнаружено. Наибольший запас характерен для группировки № 4 (10,6–11,1 г/м²). Запасы свинца в промышленной зоне (группировка № 1) в 2,8 раза превышают условный норматив [9] и в 5,9 раз региональный норматив. Стоит заметить, что на данных участках нижний предел полученных запасов свинца находится выше (в 1,4 раза) предложенного регионального норматива. Так же, превышение регионального норматива в 1,3 раза зафиксировано на участках группировки № 4 (урботёмно-серые и тёмно-серые среднесуглинистые почвы) (табл.). Для обоих участков характерна слабая степень загрязнения [9].

Количество запасов кадмия на участках группировки № 1 соответствует очень сильной степени загрязнения почв и превышает условные нормативы в 23,2 и 29,0 раза. На остальных участках запасы кадмия ниже условных нормативов. Запасы никеля превышают только условный региональный норматив на исследованных участках, относящихся к группировкам № 1 и № 4.

В целом можно отметить, что наибольшие запасы ТМ характерны для промышленных и селитебных зон со среднесуглинистыми почвами среднесуглинистого гранулометрического состава, что обусловлено активностью геохимических барьеров. Наименьшие запасы ТМ отмечены в санитарно-защитных зонах с подзолами песчаными иллювиально-железистыми, в виду очень низкой обеспеченности гумусом, лёгкости гранулометрического состава и минимальной интенсивности антропогенного воздействия.

Распределение запасов ТМ по профилям почв исследованных участков очень вари-

Таблица / Table

Зависимость запасов тяжёлых металлов в метровой толще почв представительных катен г. Курска от особенностей функционального зонирования территорий и некоторых физических и химических свойств почв (min/max) / Dependence of heavy metal reserves in the meter-thick layer of soils of representative catena in the city of Kursk on the features of functional zoning of territories and certain physical and chemical properties of soils (min/max)

№ группировки No. of grouping	Функциональная зона, тип почв, гранулометрический состав / Functional area, soil type, soil texture	Гумус в гумусовых горизонтах, % Humus in humus horizons, %	Запас тяжёлых металлов, г/м ² Reserve of heavy metals in soil, g/m ²						
			Cu	Zn	Mn	Co	Pb	Cd	Ni
1	Промышленная зона, урбанозёмы собственно на основе чернозёмов выщелоченных, средне-суглинистые / Industrial zone, Urbanozems based on leached chernozem, middle loamy soils	<u>2,6</u> 5,9	<u>18,1</u> 22,6	<u>47,4</u> 60,6	<u>286,8</u> 304,7	<u>4,8</u> 6,4	<u>33,2</u> 142,6	<u>0,6</u> 23,2	<u>27,8</u> 42,9
2	Селитебная и рекреационная зоны, аллювиально-пойменные глееватые почвы, средне и легкосуглинистые Building zone and recreation zone, Alluvial gleyic soil, light and middle loamy soils	<u>2,0</u> 6,1	<u>7,1</u> 17,6	<u>19,9</u> 67,1	<u>255,2</u> 833,2	<u>5,1</u> 6,9	<u>19,3</u> 20,4	<u>0,3</u> 0,7	<u>23,2</u> 23,5
3	Санитарно-защитная зона, подзолы песчаные иллювиально-железистые Sanitary protection zone, Podzols illuvial-ferruginous, sandy soil	<u>0,5</u> 1,9	<u>0,9</u> 3,8	<u>3,4</u> 12,8	<u>10,1</u> 67,5	<u>0,2</u> 1,8	<u>5,1</u> 13,4	<u>0,19</u> 0,20	<u>3,3</u> 5,4
4	Селитебная и рекреационная зона, урботёмно-серые и тёмно-серые почвы, среднесуглинистые / Building zone and recreation zone, Urban dark-gray soils, dark gray soils, middle loamy soils	<u>2,4</u> 4,5	<u>13,6</u> 28,3	<u>54,5</u> 84,6	<u>471,5</u> 814,1	<u>10,6</u> 11,1	<u>16,6</u> 32,5	<u>0,3</u> 0,4	<u>26,8</u> 32,1
ПДК* / МРС*			80	150	2250	35	50	1	60
Региональный условный норматив Regional conditional standard			42	77	1160	18	24	0,8	31

Примечание: * – с учётом ОДК для почв, близких к нейтральным, согласно [9]; ** – ПДК с учётом региональных особенностей физических свойств почв г. Курска.

Note: * – MPC taking into account the approximate permissible concentrations for soils close to neutral, according to [9]; ** – MPC taking into account regional features of the physical properties of soils of Kursk.

бельно и во многом зависит от классификационной принадлежности почв и концентраций ТМ в них (рис.1).

Урботёмно-серые почвы являются загрязнёнными по отдельным металлам (Zn и Pb), но имеют схожие конфигурации кривых распределения для ряда металлов: Cu, Zn, Mn, Co, Pb и Cd (рис. 1 А–F). Накопление ТМ в больших количествах в поверхностных горизонтах происходит за счёт потенциала гумусового геохимического барьера миграции поллютантов. Максимальный запас ТМ исследованных

аллювиально-пойменных почв, подзолов песчаных и урботёмно-серых почв сосредоточен в слое 0–30 см, который в большинстве случаев представлен гумусово-аккумулятивными горизонтами, исключением являются подзолы песчаные иллювиально-железистые, где гумусово-аккумулятивный горизонт отсутствует и под органогенным горизонтом залегает элювиальный.

В исследуемых урбанозёмах профильное распределение запасов ТМ значительно отличается. Здесь запас ТМ либо экспоненциально

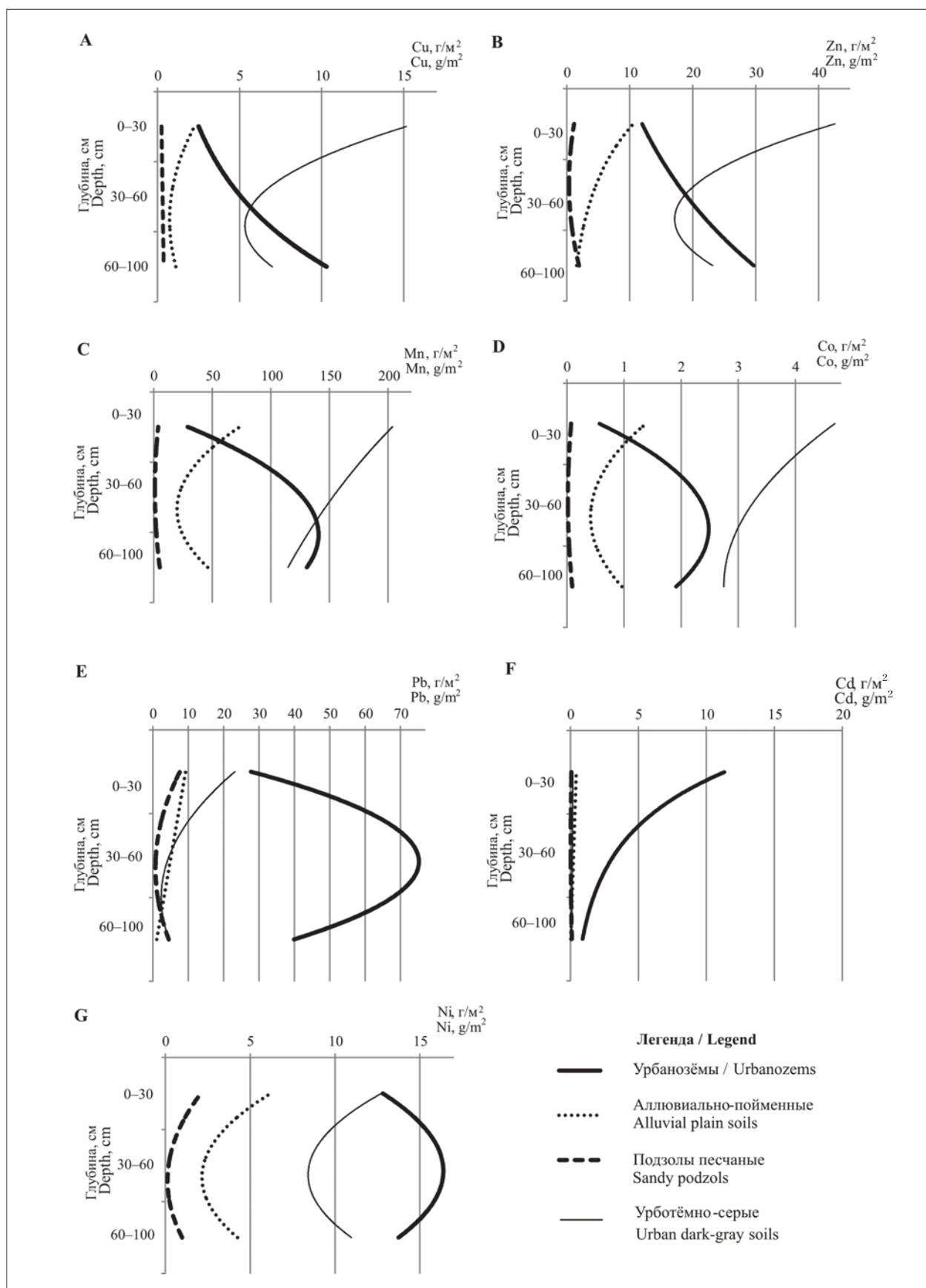


Рис. 1. Зависимость профильного распределения запасов тяжёлых металлов от типа почв г. Курска: А – Cu, В – Zn, С – Mn, Д – Co, Е – Pb, Ф – Cd, Г – Ni
Fig. 1. Dependence of the profile distribution of heavy metal reserves on the soil type of the city of Kursk: А – Cu, В – Zn, С – Mn, Д – Co, Е – Pb, Ф – Cd, Г – Ni

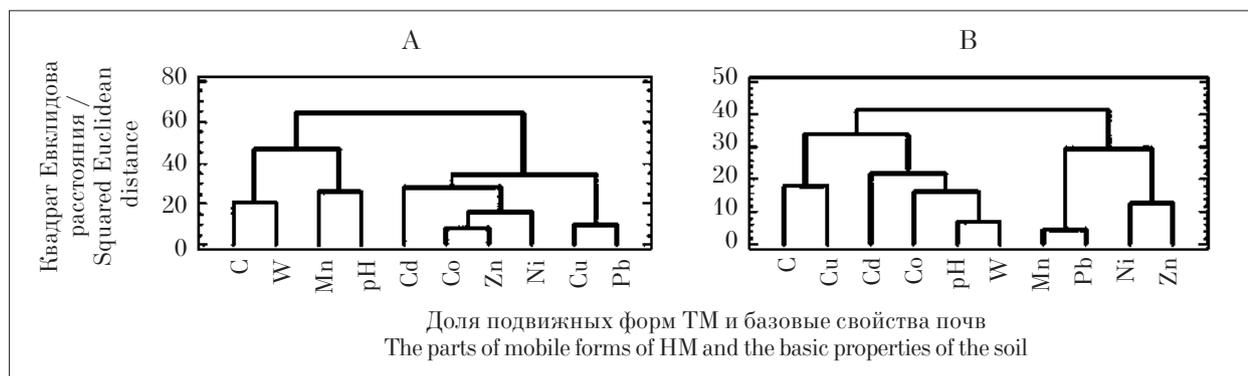


Рис. 2. Взаимоотношения долей подвижных форм тяжёлых металлов и базовых свойств почв в катенах города Курска; А – загрязнённые почвы южной части Курска, В – незагрязнённые почвы северной части Курска
Fig. 2. The correlation of the parts of mobile forms of heavy metals and the basic properties of the soil in the catenae of the city of Kursk; А – polluted soils of the southern part of Kursk, В – unpolluted soils of the northern part of Kursk

растёт вглубь по профилю, либо достигает своего максимума в слое 30–60 см, что свидетельствует о более глубоком профильном загрязнении почв. Это обусловлено сильной антропогенной трансформированностью почвенного профиля урбанозёмов (глубокой механической переработкой и наличием насыщенных грунтов различного происхождения), интенсивной эмиссией поллютантов от антропогенных объектов, высокими концентрациями некоторых ТМ и насыщенностью гумусового геохимического барьера.

Результаты кластерного анализа (рис. 2) свидетельствуют о том, что в загрязнённых ТМ почвах доля подвижных форм относительно валового содержания в большей степени зависит от конкурентных взаимоотношений элементов за связь с геохимическими барьерами, чем от количественных показателей изученных базовых свойств почв (содержание гумуса, кислотно-основные свойства и насыщенность обменными основаниями) (рис. 2А). Исключением является марганец, его мобильность находится в тесной взаимосвязи с показателем pH_{KCl} (рис. 2А).

В незагрязнённых почвах северной части города доля подвижных форм меди, кобальта и кадмия тесно коррелирует с базовыми свойствами почв. Мобильность марганца, цинка, свинца и никеля зависит от массового содержания самих металлов в почвах (рис. 2В).

Заключение

Согласно проведённой ресурсной оценке, часто загрязняющими почвы Курска элементами являются Pb, Cd и Zn. Их запасы достигают превышения условных расчётных нормативов ПДК до 5,9; 29,0 и 4,1 раза соответственно. Урбанозёмы промышленных зон отмечены как

наиболее загрязнённые почвы с глубоко сосредоточенными запасами ТМ. Высокая ёмкость гумусового геохимического барьера позволяет депонировать большую часть ТМ в гумусово-аккумулятивных горизонтах алювиально-пойменных и урботёмно-серых почв.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных-кандидатов наук МК-4086.2018.5.

Литература

1. Безуглова О.С., Горбов С.Н., Морозов И.В., Невидомская Д.Г. Урбопочвоведение: учебник. Ростов-на-Дону, 2012. 264 с.
2. Неведров Н.П., Проценко Е.П., Фомина М.Ю. Экологическая оценка почв ландшафтно-геохимических катен Сеймского округа г. Курска // Экология урбанизированных территорий. 2017. № 3. С. 18–26.
3. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
4. Falta T., Limbeck A., Koellensperger G., Hann S. Bioaccessibility of selected trace in urban PM 2.5 and PM 10 samples: a model b study // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2008. No. 390. P. 1149–1157.
5. Imperato M., Adamo P., Naimo D., Arienzo M., Stanzione D., Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) // Environmental Pollution. 1988. V. 124. No. 1. P. 47–58.
6. Linde M., Oborn I., Gustafsson J.P. Effects of changed soil conditions on the mobility of trace metals in moderately contaminated urban soils // Water, Air, and Soil Pollution. 2007. V. 183. P. 69–83.
7. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Glebova I.V. The relationship between bulk and mobile forms of heavy met-

als in soils of Kursk // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. No. 1. P. 112–119.

8. Корчагина К.В., Смагин А.В., Решетина Т.В. Новый метод оценки степени загрязнения почв цинком и свинцом с учётом изменений их концентраций и плотности сложения по профилю почв // *Вестник ОГУ*. 2013. № 10 (159). С. 264–267.

9. Смагин А.В., Шоба С.А., Макаров О.А. Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства (на примере г. Москвы). М.: Издательство Московского университета, 2008. 360 с.

10. Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // *Почвоведение*. 2011. № 5. С. 611–623.

11. Rossiter D.G. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources // *J. Soils Sediments*. 2007. V. 7. P. 96–100.

12. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжёлых металлов и металлоидов в почвах // *Почвоведение*. 2012. № 3. С. 368–375.

13. Crommentuijn T., Polder M.D., Van de Plassche E.J. Maximum permissible concentrations and negligible concentrations for metals, taking background concentrations into account. Bilthoven, Netherlands, 1997. 260 p.

14. Глебова И.В., Гридасов Д.С., Тутова О.А. Анализ экологического мониторинга территорий Курской области // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012. Т. 1. № 1. С. 74–78.

5. Imperato M., Adamo P., Naimo D., Arienzo M., Stanzione D., Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) // *Environmental Pollution*. 1988. V. 124. No. 1. P. 47–58. doi: 10.1016/S0269-7491(02)00478-5

6. Linde M., Oborn I., Gustafsson J.P. Effects of changed soil conditions on the mobility of trace metals in moderately contaminated urban soils // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2007. V. 183. P. 69–83. doi: 10.1007/s11270-007-9357-5

7. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Glebova I.V. The relationship between bulk and mobile forms of heavy metals in soils of Kursk // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. No. 1. P. 112–119. doi: 10.1134/S106422931801012X

8. Korchagina K.V., Smagin A.V., Reshetina T.V. New method of assessment of extent of pollution of soils zinc and lead taking into account changes of their concentration and density of addition on a profile of soils // *Vestnik OGU*. 2013. No. 10 (159). P. 264–267 (in Russian).

9. Smagin A.V., Shoba S.A., Makarov O.A. Ecological assessment of soil resources and technology of their reproduction (on the example of Moscow). Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2008. 360 p. (in Russian).

10. Prokofeva T.V., Martynenko I.A., Ivannikov F.A. Classification of Moscow soils and parent materials and its possible inclusion in the classification system of Russian soils // *Pochvovedenie*. 2011. No. 5. P. 611–623 (in Russian). doi: 10.1134/S1064229311050127

11. Rossiter D.G. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources // *J. Soils Sediments*. 2007. V. 7. P. 96–100. doi: 10.1065/jss2007.02.208

12. Vodyanickiy Yu.N. Standards for the contents of heavy metals and metalloids in soils // *Pochvovedenie*. 2012. No. 3. P. 368–375 (in Russian). doi: 10.1134/S1064229312030131

13. Crommentuijn T., Polder M.D., Van de Plassche E.J. Maximum permissible concentrations and negligible concentrations for metals, taking background concentrations into account. Bilthoven, Netherlands, 1997. 260 p.

14. Glebova I.V., Gridasov D.S., Tutova O.A. Analysis of environmental monitoring of territories of Kursk region // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokozyajstvennoy akademii*. 2012. V. 1. No. 1. P. 74–78 (in Russian).

References

1. Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Morozov I.V., Nevodnaya D.G. Urban soil. Rostov-on-Don: Yuzhnyy Federalnyy universitet, 2012. 264 p. (in Russian).

2. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Fomina M.Yu. Ecological assessment of soils in the landscape-geochemical catena of the Seimsky district of Kursk // *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2017. No. 3. P. 18–26 (in Russian).

3. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofeva T.V. Anthropogenous soils: genesis, geography, reclamation. Smolensk: Ojkumena, 2003. 268 p. (in Russian).

4. Falta T., Limbeck A., Koellensperger G., Hann S. Bioaccessibility of selected trace in urban PM 2.5 and PM 10 samples: a model b study // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008. V. 390. P. 1149–1157. doi: 10.1007/s00216-007-1762-5

Использование спектрофотометрии для изучения вспомогательных пигментов фотосинтезирующих микроорганизмов

© 2020. З. Б. Намсараев, к. б. н., в. н. с., Я. Э. Сергеева, к. х. н., с. н. с.,
Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
e-mail: zorigto@gmail.com

Фотосинтезирующие микроорганизмы обладают большим разнообразием вспомогательных пигментов, наиболее характерными из которых являются спириллоксантин, окенон, сфероиден у анаэробных фототрофных бактерий, фикоэритрин и фикоцианин у цианобактерий и красных водорослей, хлорофиллы *b* и *c*, а также разнообразные ксантофиллы эукариотических микроводорослей. Спектрофотометрический анализ вспомогательных пигментов позволяет получать важную информацию при проведении экологических исследований, таких как описание состава сообществ с помощью хемотаксономии, установление физиологического статуса фотосинтезирующих микроорганизмов, прогнозирование и оценка массового развития фототрофов в водоёмах. Тем не менее, при проведении исследований возможны ошибки при проведении расчётов, которые могут приводить к несоответствию реальных и расчётных данных в 10 раз. В статье анализируются основные ошибки, связанные с использованием спектрофотометрического определения вспомогательных пигментов, а также приводятся формулы и коэффициенты поглощения для широкого спектра вспомогательных пигментов, необходимые для проведения расчётов.

Ключевые слова: каротиноиды, фикобилипротеины, пигменты, фотосинтезирующие микроорганизмы, спектрофотометрия.

The use of spectrophotometry to study secondary pigments of photosynthetic microorganisms

© 2020. Z. B. Namsaraev ORCID: 0000-0002-9701-5217
Ya. E. Sergeeva ORCID: 0000-0002-6190-8800
National Research Center “Kurchatov Institute”,
1, Ploshchad Akademika Kurchatova, Moscow, Russia, 123182,
e-mail: zorigto@gmail.com

Photosynthetic microorganisms have a wide variety of secondary pigments, the most characteristic of which are spirilloxanthin, okenone, spheroidene in anoxygenic phototrophic bacteria, phycoerythrin and phycocyanin in cyanobacteria and red algae, chlorophylls *b* and *c*, as well as a variety of eukaryotic xanthophylls. Spectrophotometric analysis of secondary pigments provides important information in environmental studies, such as describing the composition of communities using chemotaxonomy, establishing the physiological status of photosynthetic microorganisms, predicting and assessing the mass development of phototrophs in water bodies. However, when conducting research, there may be errors in the calculations, which can lead to a mismatch of real and calculated data by 10 times. Such errors can be caused by the low availability of information on the absorption coefficients of most secondary pigments, the use of absorption coefficients obtained for different volumes of the solution, incorrect calculations, ignorance of the characteristic absorption spectra of high-value pigments, which leads to the acquisition of fake pigments made from cheaper pigments and inorganic fillers, etc. The purpose of this article is to present a systematic approach to the use of spectrophotometry and to review the literature on secondary pigments of photosynthetic microorganisms with in order to solve various environmental problems, for example, to describe the taxonomy and functional diversity of phytoplankton using secondary pigments. The article analyzes the main errors associated with the use of spectrophotometric determination of secondary pigments, as well as the formulas necessary for calculations and absorption coefficients for the following secondary pigments: isorenieratene, α -carotene, β -carotene, γ -carotene, astaxanthin, violaxanthin, diadinoxanthin, diatoxanthin, zeaxanthin, lutein, neoxanthin, okenone, peridinine, spirilloxanthin, spheroidene, fucoxanthin.

Keywords: carotenoids, phycobiliproteins, pigments, photosynthetic microorganisms, spectrophotometry.

Вспомогательные пигменты (ВП) (каротиноиды, фикобилипротеины и ряд хлорофиллов), как правило, выполняют светособирающую или светозащитную функцию в клетках микроорганизмов. Фотосинтезирующие микроорганизмы (ФМ) обладают большим разнообразием вспомогательных пигментов, наиболее характерными из которых являются спириллоксантин, окенон, сфероиден у аноксигенных фототрофных бактерий, фикоэритрин и фикоцианин у цианобактерий и красных водорослей, хлорофиллы *b* и *c*, а также разнообразные ксантофиллы эукариотических микроводорослей [1–3].

Идентификация индивидуальных пигментов, а также определение их концентрации играют важную роль в экологических исследованиях, например, при проведении дистанционного зондирования Земли. Основным анализируемым видом пигментов является хлорофилл *a*. Однако в результате ряда исследований было показано, что анализ концентрации хлорофилла *a* желательнее дополнять анализом ВП. Например, использование «хлорофилл/каротиноидного индекса» позволяет более точно оценивать фотосинтетическую активность вечнозелёных растений, что приводит к повышению точности моделей оценки баланса углерода в лесных экосистемах [4]. Анализ содержания фикоцианина в воде позволяет проводить более точную оценку количества цианобактерий в водоёмах, что имеет важное значение с точки зрения предсказания возможных эффектов массового развития потенциально токсичных цианобактерий [5]. Также изучение качественного состава ВП в природных образцах позволяет выявлять доминирующие в составе сообществ типы ФМ и проводить предварительную оценку их физиологического состояния [6].

Кроме экологических исследований, анализ ВП имеет важное прикладное значение в палеобиологии, где он применяется в качестве биомаркеров массового развития ФМ в древности [7]. Также некоторые ВП имеют коммерческое значение и используются как антиоксиданты, пищевые красители, пищевые добавки и т. д. По состоянию на 2014 г. рынок каротиноидов оценивался в 1,4 млрд долларов США, при этом стоимость синтетических каротиноидов составляла от 250 до 2000 долларов/кг, а стоимость природных каротиноидов от 350 до 7500 долларов/кг [8]. Среди фикобилипротеинов одним из основных коммерческих продуктов является

фикоцианин, стоимость которого оценивается примерно в 500 долларов/кг [9]. В любом из вышеприведённых примеров определение точного содержания пигмента в анализируемом образце имеет важнейшее значение. Это может быть как проведение наземной калибровки данных, полученных с использованием спутниковых методов анализа, так и определение качества и подлинности продуктов, содержащих ВП.

Хроматографические методы анализа обладают наибольшей точностью качественного и количественного состава ВП. Тем не менее, спектрофотометрический анализ является эффективным и более доступным методом исследования [10]. Одной из важных проблем, встающих перед исследователями (в отсутствие индивидуальных стандартов пигментов), является малая доступность информации о точных значениях коэффициентов поглощения большинства ВП. Например, в широко распространённых справочниках часто приводится информация о длинах волн максимумов поглощения ВП, но не приводится информация о коэффициентах поглощения [11]. Это приводит к тому, что при количественных расчётах исследователи вынуждены использовать коэффициенты поглощения других пигментов (например, β -каротина) вместо величин истинных коэффициентов, соответствующих идентифицированным в растворе пигментам. Также, важным источником ошибки при количественном определении содержания пигмента может являться использование коэффициентов поглощения, полученных для разных объёмов раствора (выраженных к различным объёмам – 100 мл или 1 л), что приведёт к несоответствию реальных и расчётных данных в 10 раз. Кроме того, встречаются ошибки в расчётах, связанные с некорректным использованием формулы Бугера-Ламберта-Бэра или незнание характерных спектров поглощения пигментов, обладающих высокой стоимостью, что приводит к приобретению фальсифицированных реактивов, изготовленных из более дешёвых пигментов и неорганических наполнителей и т. д.

Целью данной статьи является представление систематизированного подхода к использованию спектрофотометрии и обобщение литературных данных о ВП (каротиноидов и фикобилипротеинов) для решения различных экологических задач, например, для описания таксономии и функционального разнообразия фитопланктона с использованием ВП-биомаркеров.

Каротиноиды

В настоящее время в природе обнаружено более 750 каротиноидов, из которых примерно для тридцати показана функциональная роль в фотосинтетических светособирающих комплексах [3]. Каротиноиды, состоящие только из атомов углерода и водорода (например, β -каротин, ликопин), известны как каротины; оксигенированные производные называются ксантофиллами. Обычно кислородсодержащими заместителями являются гидроксид-, кето-, эпокси- и альдегидные группы. Каротиноиды могут быть ациклическими (например, ликопен), моноциклическими (например, γ -каротин) или дициклическими (например, α - и β -каротин). В природе каротиноиды существуют в основном в более стабильной полностью *транс*- (или E) форме, но встречаются небольшие количества *цис*- (или Z) изомеров.

При анализе спектра поглощения каротиноидов следует принимать во внимание такие характеристики, как положение максимумов поглощения (длина/ы волны максимума/ов поглощения (λ_{max})) и профиль самого спектра. Полиеновая структура каротиноидов обуславливает интенсивное поглощение в интервале от 400 до 500 нм, что соответствует характерной для этих соединений окраске: жёлтой, оранжевой, красной. Для большинства каротиноидов характерно наличие трёх максимумов поглощения (рис.): наиболее коротковолновый максимум обозначается

порядковым номером I, центральный имеет номер II, и длинноволновый максимум имеет номер III. Помимо данных о максимумах поглощения, часто приводятся данные о соотношении (выраженном в %) интенсивности (высот) третьего максимума поглощения ко второму (III/II, %) (рис.), принимая за базовую линию минимум оптической плотности между этими двумя максимумами поглощения. Величина данного показателя также зависит от полярности растворителя, используемого для снятия спектра.

Для расчёта концентрации индивидуального пигмента (в мкг/мл) в экстракте используется формула с учётом закона Бугера-Ламберта-Бэра:

$$c = \frac{A \cdot 10^4}{E_{1cm}^{1\%} \cdot l},$$

где A – оптическая плотность самого большого характерного максимума поглощения (оптическая плотность раствора, как правило, должна находиться в диапазоне между 0,2 и 0,8), $E_{1cm}^{1\%}$ – специфический абсорбционный коэффициент 1% (масса/объём) раствора индивидуального пигмента в кювете толщиной 1 см, выраженный в 100 мл/(г · см), l – толщина кюветы в см. Значения коэффициента $E_{1cm}^{1\%}$ для основных вспомогательных пигментов приведены в таблице. Необходимо учитывать, что в отдельных случаях коэффициент $E_{1cm}^{1\%}$ приводится в расчёте не на 100 мл, а на 1 л. В таком случае величина коэффициен-

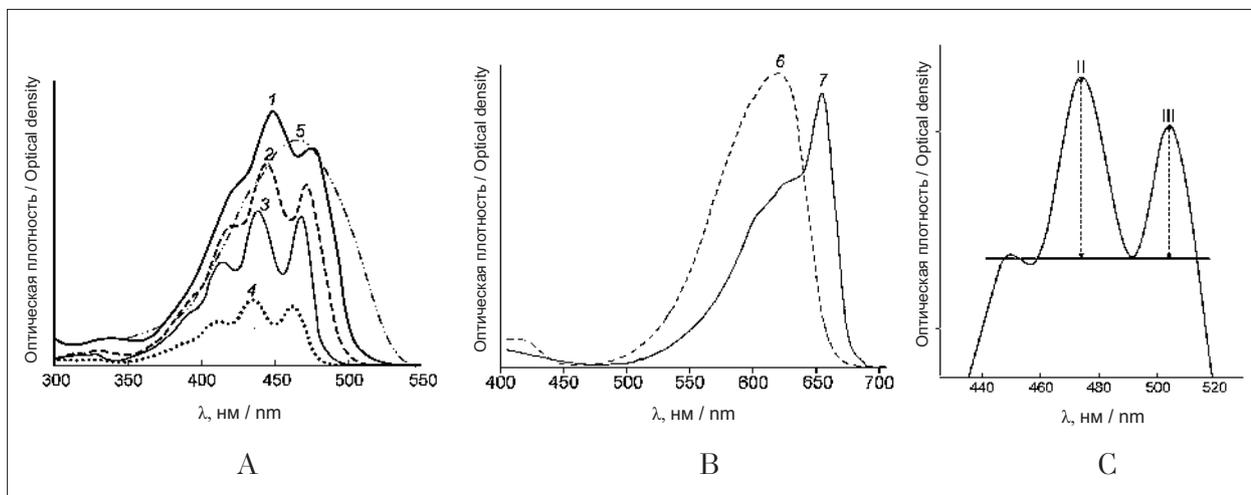


Рис. Спектры поглощения пигментов: индивидуальных каротиноидов (А) и фикобилипротеинов (В): 1 – β -каротин; 2 – лютеин; 3 – виолаксантин; 4 – неоксантин; 5 – астаксантин; 6 – С-фикоцианин; 7 – С-аллофикоцианин. Определение величин интенсивностей (высот) второго (II) и третьего (III) максимумов поглощения (С) для вычисления соотношения III/II (%)

Fig. Absorption spectra of pigments: individual carotenoids (A) and phycobiliproteins (B): 1 – β -carotene; 2 – lutein; 3 – violaxanthin; 4 – neoxanthin; 5 – astaxanthin; 6 – C-phyco cyanin; 7 – C-allophycocyanin. Determination of intensities (heights) of the second (II) and third (III) absorption maxima (C) for the calculation the ratio III/II (%)

Таблица / Table

Максимумы поглощения и коэффициенты экстинкции каротиноидов фотосинтезирующих микроорганизмов / Absorption maxima and extinction coefficients of carotenoids of photosynthetic microorganisms

Пигмент (молекулярная масса) Pigment (MW)	Растворитель Solvent	$\lambda_{\text{макс}}$ (нм) / λ_{max} (nm)			III/II, %	$E_{1\text{cm}}^{1\%}$ 100 мл/(г·см) 100 mL/(g·cm)	Ссылка Reference
		I	II	III			
Каротины / Carotenes							
Изорениратин Isorenieratene (528,81)	бензол / benzene	443	465	493	—*	2330	[12]
	петролейный эфир petroleum ether	425	450	477	—	2080	[13]
<i>a</i> -каротин <i>a</i> -carotene (536,87)	ацетон / acetone	424	448	476	55	—	[13]
	гексан / hexane	422	445	473	55	2710	
	хлороформ chloroform	433	457	484	—	—	
<i>b</i> -каротин <i>b</i> -carotene (536,87)	ацетон / acetone	(426)**	454	480	21	2500	[13]
	гексан / hexane	(422)	450	478	36	2592	
	хлороформ chloroform	435	461	485	—	2400	
	этанол / ethanol	(428)	451	480	27	2620	
<i>g</i> -каротин <i>g</i> -carotene (536,87)	ацетон / acetone	424	448	476	55	—	[13]
	гексан / hexane	422	445	473	55	2710	
	хлороформ chloroform	433	457	484	—	—	
Ксантофиллы / Xanthophylls							
Астаксантин Astaxanthin (596,84)	ацетон / acetone	нет по	475– 480	нет по	—	—	[13]
	гексан / hexane		466– 468		—	2100	
	хлороформ chloroform		485		—	—	
Виолаксантин Violaxanthin (600,87)	ацетон / acetone	415	438	467	79	—	[13]
	гексан / hexane	нет по	443	472	—	—	
	хлороформ chloroform	423	452	482	—	—	
	этанол / ethanol	417	440	469	93	2550	
Диадиноксантин Diadinoxanthin (582,85)	ацетон / acetone	(428)	449	479	75	2240	[14]
	гексан / hexane	(421)	445	475	63	—	
	этанол / ethanol	(424)	445	476	64	—	
Диатоксантин Diatoxanthin (566,86)	ацетон / acetone	430	453	480	42	2720	[14]
	гексан / hexane	(426)	451	480	31	—	
	этанол / ethanol	(428)	452	478	—	—	
Зеаксантин Zeaxanthin (568,87)	ацетон / acetone	(428)	454	481	33	—	[15]
	гексан / hexane	(424)	450	478	46	2340	
	хлороформ chloroform	429	462	494	—	—	
	этанол / ethanol	(428)	450	478	26	—	
Лютеин Lutein (568,87)	ацетон / acetone	425	447	476	67	—	[13]
	гексан / hexane	421	444	473	76	—	
	этанол / ethanol	422	445	474	62	2550	
Неоксантин Neoxanthin (600,87)	ацетон / acetone	416	437	466	84	—	[13]
	гексан / hexane	416	440	469	94	—	
	этанол / ethanol	418	442	471	91	2380	

Пигмент (молекулярная масса) Pigment (MW)	Растворитель Solvent	$\lambda_{\text{макс}}$ (нм) / λ_{max} (nm)			III/II, %	$E_{1\text{cm}}^{1\%}$ 100 мл/(г · см) 100 mL/(g · cm)	Ссылка Reference
		I	II	III			
Окенон Okenone (578,88)	ацетон / acetone	(465)	487	518	–	–	[16]
	петролейный эфир petroleum ether	(460)	484	516	13	2320	[17]
Перидинин Peridinine (630,81)	ацетон / acetone	–	465	–	–	1340	[14]
	гексан / hexane	(430)	454	483	74	–	
	этанол / ethanol	–	475	–	–	1350	
Спириллоксантин Spirilloxanthin (596,94)	ацетон / acetone	470	497	530	–	–	[12]
	гексан / hexane	463	492	526	–	2540	[18]
	хлороформ chloroform	475	505	543	–	–	[12]
Сфероиден Spheroidene (568,91)	метанол methanol	427	452	482	78,5	2765	[16]
Фукоксантин Fucoxanthin (658,91)	ацетон / acetone	(420)	444	467	5	1660	[13]
	гексан / hexane	(428)	446	475	40	–	
	хлороформ chloroform	Нет No	460	(478)	–	–	

Примечание / Note: * – данные не приведены/data not shown; ** (λ) длина волны неявно выраженного плеча / wavelength of the implicit tshoulder.

та уменьшается в 10 раз, что обязательно нужно принимать во внимание во время расчётов, так как это может привести к ошибке измерений на один порядок.

В случае экстракции суммарных пигментов из биомассы цианобактерий и микроводорослей уравнение, полученное на основании закона Бугера-Ламберта-Бэра, становится более сложным, так как в растворе помимо каротиноидов содержатся также и хлорофиллы. Для расчёта можно воспользоваться формулами (2–10) для различных растворителей из работы [19], где c_a – концентрация хлорофилла a в мкг/мл экстракта, c_b – концентрация хлорофилла b , $c_{(x+c)}$ – концентрация суммарных каротиноидов, A_λ – оптическая плотность при соответствующей длине волны (λ).

Ацетон (чистый):

$$c_a = 11,24 A_{661,6} - 2,04 A_{664,8}, \quad (2)$$

$$c_b = 20,13 A_{664,8} - 4,19 A_{661,6}, \quad (3)$$

$$c_{(x+c)} = \frac{1000 A_{470} - 1,90 c_a - 63,14 c_b}{214}. \quad (4)$$

Диэтиловый эфир (чистый):

$$c_a = 10,05 A_{660,6} - 0,97 A_{642,2}, \quad (5)$$

$$c_b = 16,36 A_{642,2} - 2,43 A_{660,6}, \quad (6)$$

$$c_{(x+c)} = \frac{1000 A_{470} - 1,43 c_a - 35,87 c_b}{205}. \quad (7)$$

Метанол (чистый):

$$c_a = 16,72 A_{665,2} - 9,16 A_{652,4}, \quad (8)$$

$$c_b = 31,09 A_{652,4} - 15,28 A_{665,2}, \quad (9)$$

$$c_{(x+c)} = \frac{1000 A_{470} - 1,63 c_a - 104,96 c_b}{221}. \quad (10)$$

Фикобилипротеины

Цианобактерии и красные водоросли поглощают свет, главным образом, в синей и красной области видимого спектра ввиду наличия из основных пигментов только хлорофилла a . Для компенсации и оптимизации сбора световой энергии в тилакоидной мембране данных организмов собираются супрамолекулярные комплексы, известные как фикобилисомы, способные поглощать свет в диапазоне 500–660 нм. Каждая фикобилисома состоит из окрашенных белков, называемых фикобилипротеинами, среди которых выделяется три класса: аллофикоцианин (зелёно-голубого цвета), фикоцианин (синего цвета), фикоэритрин (красного цвета) [20]. При этом величины максимумов поглощения фикобилипротеинов могут различаться в зависимости от организма, из которого они выделены [21]. Фикобилипротеины гидрофильны по своей природе и для их выделения традиционно

используется фосфатный буфер. При этом на положение максимумов поглощения фикобилипротеинов влияет величина pH буферного раствора, поэтому при определении удельного коэффициента экстинкции для фикобилипротеинов используют растворы с заданной величиной pH.

Следует отметить, что коэффициенты экстинкции могут различаться в различных работах. Так, при изучении фикобилипротеинов красной водоросли *Furcellaria lumbricalis* [22] использовали аналитические стандарты R-фикоэритрина (максимум поглощения 566 нм, молекулярная масса 240 кДа), С-фикоцианина (620 нм, 30 кДа) и аллофикоцианина (652 нм, 105 кДа) и молярные коэффициенты экстинкции $2,00 \cdot 10^6$, $1,85 \cdot 10^6$ и $0,7 \cdot 10^6$ л/(М · см соответственно). В работе [23] коэффициент экстинкции для фикобилипротеинов, выделенных из *Arthrospira platensis* (устаревшее название *Spirulina platensis*), составил 73 и 58 для фикоцианина и аллофикоцианина соответственно.

Наиболее часто для расчёта содержания (мг/мл) фикоцианина (PC), аллофикоцианина (APC), фикоэритрина (PE) используют формулы (11–13), предложенные в работе [13]:

$$PC = \frac{A_{620} - 0,474 A_{650}}{5,34}, \quad (11)$$

$$APC = \frac{A_{650} - 0,208 A_{620}}{5,09}, \quad (12)$$

$$PE = \frac{A_{560} - 2,41PC - 0,849APC}{9,62}. \quad (13)$$

Заключение

Таким образом, при правильном использовании спектрофотометрические методы анализа, описанные в статье, позволяют получать важную информацию о количественном и качественном составе ВП, что имеет значение для экологических исследований, таких как описание сообществ с помощью хемотаксономии ВП, установление физиологического статуса фотосинтезирующих организмов, прогнозирование и оценка массового развития фототрофов в водоёмах и т. д. [24, 25].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-29-05103. Статья опубликована при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

References

1. Takaichi S. Carotenoids and carotenogenesis in anoxygenic photosynthetic bacteria // The photochemistry of carotenoids. Dordrecht: Springer, 1999. P. 39–69. doi: 10.1007/0-306-48209-6_3
2. Takaichi S. Distribution and biosynthesis of carotenoids // The purple phototrophic bacteria. Dordrecht: Springer, 2009. P. 97–117. doi: 10.1007/978-1-4020-8815-5_6
3. Takaichi S. Carotenoids in algae: distributions, biosyntheses and functions // Marine drugs. 2011. V. 9. No. 6. P. 1101–1118. doi: 10.3390/md9061101
4. Gamon J.A., Huemmrich K.F., Wong Ch.Y.S., Ensminger I., Garrity S., Hollinger D.Y., Noormets A., Peñuelas J. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016. V. 113. No. 46. P. 13087–13092. doi: 10.1073/pnas.1606162113
5. Varunan T., Shanmugam P. An optical tool for quantitative assessment of phycocyanin pigment concentration in cyanobacterial blooms within inland and marine environments // Journal of Great Lakes Research. 2017. V. 43. No. 1. P. 32–49. doi: 10.1016/j.jglr.2016.11.001
6. Krishnaveni N., Shenbaga Devi A., Santhanam P. A method of analysis of pigments in phytoplankton // Basic and applied phytoplankton biology / Ed. P. Santhanametal. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. P. 221–227. doi: 10.1007/978-981-10-7938-2_11
7. Meyer K.M., Macalady J.L., Fulton J.M., Kump L.R., Schaperdoth I., Freeman K.H. Carotenoid biomarkers as an imperfect reflection of the anoxygenic phototrophic community in meromictic Fayetteville Green Lake // Geobiology. 2011. V. 9. No. 4. P. 321–329. doi: 10.1111/j.1472-4669.2011.00285.x
8. Carotenoids market [Internet resource] <https://www.deinove.com/en/profile/strategy-and-markets/carotenoids-market> (Accessed: 11.11.2019).
9. Chaiklahan R., Chirasuan N., Loha V., Tia S., Bunnag B. Stepwise extraction of high-value chemicals from *Arthrospira* (*Spirulina*) and an economic feasibility study // Biotechnology Reports. 2018. V. 20. P. e00280. doi: 10.1016/j.btre.2018.e00280
10. Namsaraev Z.B. Application of extinction coefficients for quantification of chlorophylls and bacteriochlorophylls // Microbiology. 2009. V. 78. No. 6. P. 794–797. doi: 10.1134/S0026261709060174
11. Dawson R., Elliot D., Elliot W., Jones C. Handbook of Biochemist. Moskva: Mir, 1991. 554 p. (in Russian).
12. Foppen F.H. Tables for the identification of carotenoid pigments // Chromatogr. Rev. 1971. V. 14. No. 3. P. 133–298. doi: 10.1016/0009-5907(71)80012-1
13. Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H. Carotenoids: Handbook. Basel: Birkhauser Verlag, 2004. 645 p.
14. Roy S., Llewellyn C.A., Egeland E.S., Johnsen G. Phytoplankton pigments: characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 845 p.

15. Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C., Bjarnland T. Data for the identification of 47 key phytoplankton pigments // *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods* / Ed. S.W. Jeffrey, R.F.C. Mantoura, S.W. Wright. Paris: UNESCO Publishing, 1997. P. 449–559.
16. Liaaen-Jensen S. The constitution of some bacterial carotenoids and their bearing on biosynthetic problems. Trondheim: Kgl. Norske Vit. Selsk. Skrifter, 1962. 199 p.
17. Takaichi S., Shimada K. Characterization of carotenoids in photosynthetic bacteria // *Methods Enzymol.* 1992. V. 213. P. 374–385. doi: 10.1016/0076-6879(92)13139-0
18. Zapata M., Jeffrey S., Wright S., Rodriguez F., Garrido J.L., Clementson L. Photosynthetic pigments in 37 species (65 strains) of Haptophyta: implications for oceanography and chemotaxonomy // *Mar Ecol. Prog. Ser.* 2004. V. 270. P. 83–102. doi: 10.3354/meps270083
19. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods Enzymol.* 1987. V. 148. P. 350–382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
20. Stadnichuk I.N., Krasilnikov P.M., Zlenko D.V. Cyanobacterial phycobilisomes and phycobiliproteins // *Microbiology.* 2015. V. 84. No. 2. P. 101–111. doi: 10.1134/S0026261715020150
21. Zhao K.-H., Porra R.J., Scheer H. Phycobiliproteins // *Phytoplankton pigments: characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography* / Ed. R. Suzanne. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. P. 375–411.
22. Saluri M., Kaldmäe M., Tuvikene R. Extraction and quantification of phycobiliproteins from the red alga *Furcellaria lumbricalis* // *Algal Research.* 2019. V. 37. P. 115–123. doi: 10.1016/j.algal.2018.11.013
23. Boussiba S., Richmond A.E. Isolation and characterization of phycocyanins from the blue-green alga *Spirulina platensis* // *Arch. Microbiol.* 1979. V. 120. P. 155–159. doi: 10.1007/BF00409102
24. Saltan N.V., Sviatkovskaya E.A., Shlapak E.P., Trostenyuk N.N., Gontar O.B. Changes in the photosynthetic activity of wood plants under a coal terminal environment // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 2. P. 68–74. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-068-074
25. 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

Определение трофического статуса водоёма и пространственного распределения водной растительности по интегральным показателям

© 2020. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Рутман¹, инженер,
Т. Я. Ашихмина^{1, 2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

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

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kutyavinati@gmail.com

Определение трофического статуса водоёма необходимо для принятия решений об его использовании для производственных и бытовых целей. Расчёт индекса трофического состояния (ИТС) водоёма, основанный на измерении величины водородного показателя и содержания растворённого кислорода в воде, позволяет оценить трофическое состояние водного объекта вне зависимости от его типа и региона исследования. По результатам многолетних данных установлена зависимость величины рН от степени насыщения воды кислородом для одного из крупнейших водоёмов Кировской области, подверженного эвтрофикации (Омутнинского водохранилища). По найденной зависимости рассчитан ИТС водоёма. За 9 лет наблюдений ИТС увеличился с 7,8 до 8,1 ед., что свидетельствует о переходе Омутнинского водохранилища из мезотрофного в эвтрофный тип. С помощью методов дистанционного зондирования Земли на акватории водоёма выявлены участки массового развития фитопланктона и высших водных растений. Данные, полученные при расчёте индекса мутности и индекса концентрации хлорофилла *a* в воде, согласуются с данными полевых наблюдений и могут быть в дальнейшем использованы при проведении экологического мониторинга Омутнинского водохранилища и других водоёмов региона.

Ключевые слова: эвтрофикация, «цветение» воды, растворённый кислород в воде, индекс трофического состояния, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, индекс мутности, индекс концентрации хлорофилла *a*.

Determination of the trophic status of the water reservoir and spatial distribution of aquatic vegetation by integral indicators

© 2020. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636^{*}

V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487^{*}

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

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: kutyavinati@gmail.com

Determination of the trophic status of a reservoir is necessary for making decisions on the use of a water body for industrial production and domestic purposes. The calculation of the trophic state index (ITS) of a reservoir based on measuring the value of the hydrogen index and the content of dissolved oxygen in water allows us to evaluate the trophic state of a water body, regardless of its type and region of study. According to the results of the physicochemical analysis of water for 2011–2019, the dependence of pH on the degree of oxygen saturation of water was established for one of the largest reservoirs in the Kirov region (Omutninsky reservoir) which is subjected to eutrophication. Based on the dependence found, the ITS index of the reservoir was calculated. Over 9 years of observations, ITS increased from 7.8 to 8.1 units, which indicates the transition of the Omutninsk reservoir from the mesotrophic to the eutrophic type. Using the Earth remote sensing methods for the reservoir, areas of mass development of phytoplankton and higher aquatic plants have been identified. Field observations in these areas revealed thickets of *Equisetum fluviatile* L., *Scirpus lacustris* L., *Persicaria amphibia* (L.) S. F. Gray, *Rotamogeton lucens* L. The data obtained by calculating the turbidity index and

the concentration index of chlorophyll *a* in water are consistent with field data observations and can be further used in environmental monitoring of the Omutninsk reservoir and other reservoirs in the region.

Keywords: eutrophication, algae “bloom”, dissolved oxygen, index of trophical state, Earth remote sensing, Sentinel-2, turbidity index, chlorophyll *a* concentration index.

Одной из острых проблем современности является эвтрофирование водоёмов, при котором наблюдается изменение их трофического статуса, массовое развитие в воде водорослей и цианобактерий, высших растений [1, 2]. Актуальная информация об изменениях трофического состояния водных объектов необходима для принятия решений о пригодности их для хозяйственно-питьевого водоснабжения и промышленно-бытовых нужд.

Для исследования и мониторинга водных объектов широко применяются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они не требуют прямого взаимодействия с исследуемым объектом и позволяют рассматривать достаточно крупные и отдалённые акватории. Главным образом, ведётся дистанционный мониторинг морей и океанов с целью отслеживания изменений береговой линии [3, 4], наблюдения за движением плавучих льдов [5], распространением нефтяных пятен и другого рода загрязнений [6], распространением фитопланктона [7, 8]. Дистанционное зондирование для изучения наземных водных объектов используется реже. При дистанционном мониторинге подобных объектов возникает ряд сложностей. На качество снимка влияет состояние атмосферы на момент съёмки. Специфичным для наземных водных объектов является их размер. Минимальное разрешение изображения, снятого с космического аппарата Sentinel-2, составляет 10 м. На снимках с крупным разрешением малые водоёмы будут неразличимы. Поэтому, минимальная ширина реки или водоёма должна составлять не менее 100 м при десятиметровом разрешении снимка. Методы ДЗЗ позволяют обнаружить в водных объектах скопления фитопланктона и заросли высших растений, проследить динамику их развития [7, 9].

Использование комплекса традиционных наземных и дистанционных методов исследования позволяет получать более точные сведения о состоянии водных объектов и составлять прогноз об изменении их трофического состояния.

Цель данной работы – определение трофического статуса водоёмов, в разной степени подверженных эвтрофированию, а также пространственного распределения по аква-

тории фитопланктона и зарослей высших водных растений с помощью наземных и дистанционных методов исследования.

Материалы и методы

Исследование проводили на крупных водохранилищах Кировской области: Белохолуницком, Омутнинском, Большом Кирсинском и Чернохолуницком. Это искусственные водоёмы, созданные для водоснабжения металлургических заводов региона путём сооружения плотин на реках ещё в XVIII веке. С помощью химических и биологических методов исследования установлено, что по трофо-сапробным показателям все изучаемые водохранилища являются β-мезосапробными, по трофической шкале классификации водоёмов они соответствуют эвтрофному классу. При этом Омутнинское водохранилище является наиболее загрязнённым аммонийным азотом и органическими веществами по перманганатной окисляемости и химическому потреблению кислорода. По видовому составу высшей водной растительности и степени зарастания оно является слабоэвтрофным, по степени развития микроорганизмов относится к мезосапробной зоне, по отношению БПК₅/перманганатная окисляемость испытывает сильное сапробное загрязнение [10]. Данный водоём выбран в качестве модельного для дальнейшего исследования.

В ходе работы рассчитан индекс трофического состояния (ИТС), разработанный в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете для оценки экологического состояния водных объектов [11]. Индекс представляет собой интегральный показатель, основанный на линейной зависимости величины рН от насыщения воды кислородом. По величине ИТС можно определить трофическое состояние водоёма. Для дистрофных водоёмов значения индекса менее 6,0; ультраолиготрофных – 6,0–6,7; олиготрофных – 6,7–7,3; мезотрофных – 7,3–8,0; эвтрофных – более 8,0 единиц [11, 12].

Степень развития фитопланктона и высших растений в поверхностном слое воды определяли по данным ДЗЗ. В качестве источника для дешифрирования данных ДЗЗ были

задействованы снимки спутника Sentinel-2B, находящиеся в открытом доступе, с разрешением 10 м. Пригодными для дешифрирования в 2019 г. оказались снимки от 15 августа, 7 и 10 сентября. Для исследования водных объектов и растительности использовали синий (B2, 459–525 нм), зелёный (B3, 541–577 нм) и красный (B4, 650–681 нм) каналы. В ходе работы были рассчитаны индекс концентрации хлорофилла *a* в воде (формула расчёта: (B2-B4)/B3) и индекс мутности воды (формула расчёта: B2/(B2 + B3 + B4)). [13]. Как отмечают авторы работы [13], коэффициент корреляции между фактическим содержанием хлорофилла *a* и значениями индекса его концентрации составляет -0,78; между мутностью воды и значениями индекса мутности $r = 0,73$. Для построения индексных карт использовали программный продукт QGIS версии 3.10.

Результаты и обсуждение

На основе результатов гидрохимического анализа за 2011–2019 гг. для Омутнинского водохранилища была выявлена зависимость величины рН от степени насыщения воды кислородом (рис. 1), которая подтверждается статистическим анализом результатов по *t*-критерию Стьюдента. В работе [12] показано, что в водоёмах различного трофического уровня величина рН и процентное содержание кислорода тесно коррелируют ($r = 0,70–0,99$), их связь носит линей-

ный характер. Наши результаты согласуются с этим положением, коэффициент корреляции равен 0,82.

За период исследования значения рН изменялись в достаточно широких пределах, от 6,6 до 9,4 ед. (рис. 1), однако слабощелочная реакция среды преобладала. Согласно [11], величина рН, рассчитанная по найденным зависимостям для нормального 100%-ного насыщения воды кислородом, тем больше, чем выше трофический статус водоёма, и может служить интегральным показателем его трофического состояния.

Индекс ИТС, рассчитанный по результатам химического анализа воды Омутнинского водохранилища, увеличился с 7,8 в 2011 г. до 8,1 ед. в 2019 г. Согласно классификации по величине ИТС, водоём за 9 лет наблюдений перешёл из мезотрофного типа в эвтрофный. Как правило, при таком переходе наблюдается увеличение скорости первичного продуцирования, массовое развитие фитопланктона и высших водных растений [14].

Пространственное и временное распределение фитопланктона и высших растений в поверхностном слое воды можно оценить с помощью расчёта таких спектральных индексов, как индексы концентрации хлорофилла *a* в воде и мутности.

Скопления фитопланктона и высших растений в Омутнинском водохранилище встречаются преимущественно в верховье и центральной части водоёма. Об этом свидетель-

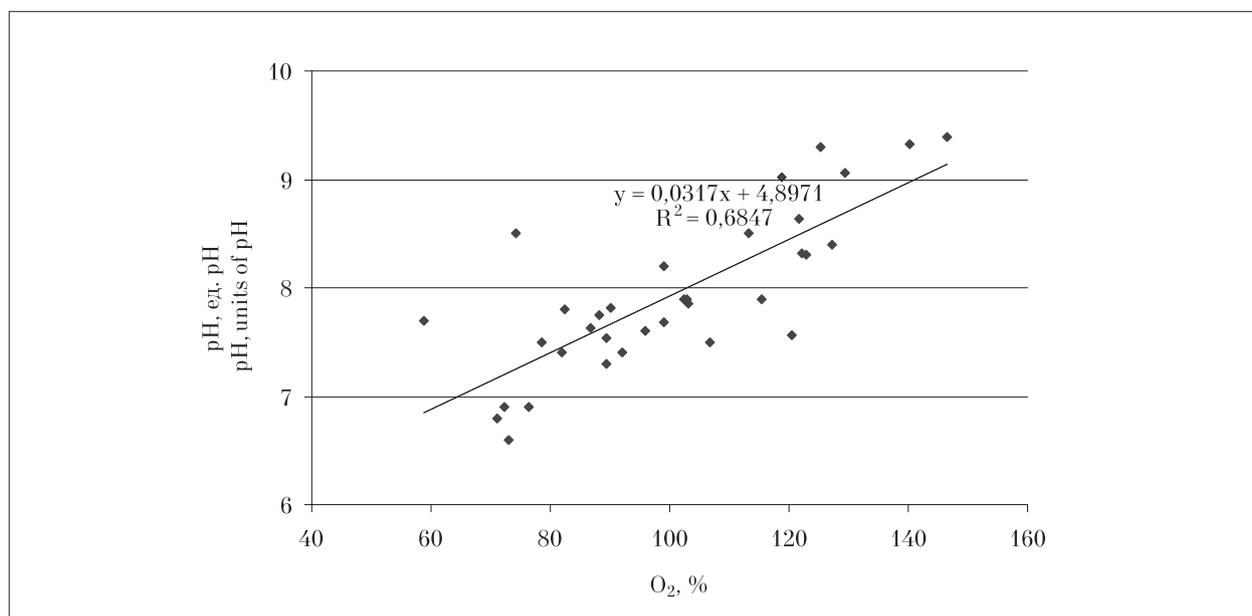


Рис. 1. Корреляционная зависимость рН от степени насыщения воды кислородом в Омутнинском водохранилище ($p < 0,05$)
Fig. 1. The correlation dependence of pH on the degree of saturation of water with oxygen in the Omutninsk reservoir ($p < 0,05$)

ствуют результаты дешифрирования космических снимков, а также данные полевых наблюдений 2011–2019 гг. На рисунках 2 и 3 (см. обложку, с. 3) представлены карты Омутнинского водохранилища, построенные по результатам расчёта индексов концентрации хлорофилла *a* и мутности воды в 2019 г.

Высокая концентрация хлорофилла *a* в летние месяцы отмечена в верховье водоёма, вблизи устья реки Омутной. На этой акватории при полевых наблюдениях были обнаружены заросли хвоща речного (*Equisetum fluviatile* L.), отдельными куртинами встречался камыш озёрный (*Scirpus lacustris* L.) и горец земноводный (*Persicaria amphibia* (L.) S. F. Gray). Значения индекса на этом участке достигали 0,4–0,5 ед. Далее, при продвижении к центральному участку, значения индекса возрастали до 0,8–0,9 ед., а на мелководных участках в приплотинной части водоёма снова снижались. В самой северной части водоёма выделяется участок с минимальными значениями индекса концентрации хлорофилла (0,4–0,5 ед.). На нём при полевых наблюдениях отмечены заросли рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.).

В осенний период максимальные значения индекса зарегистрированы ближе к центральной части водохранилища. На снимке чётко выделяется участок акватории со значениями индекса до 0,9 ед. (рис. 2). Минимальные значения индекса (0,4–0,5 ед.), также как и в летние месяцы, отмечены в верховье водоёма и на небольшом участке в его приплотинной части. Так как источники антропогенного воздействия в верховье водоёма практически отсутствуют, вероятно, что повышение биологической продуктивности на данном участке может быть связано с природными факторами.

Участки с максимальными значениями индекса концентрации хлорофилла *a* совпадают с участками, на которых отмечена высокая мутность воды (рис. 3).

Как видно из рисунка 3, мутность воды на разных участках водохранилища отличается от 0,40 до 0,50 ед. Минимальные значения индекса мутности отмечены в верховье водоёма (в месте впадения р. Омутной) и на приплотинном участке (в северной части водоёма). Наибольшие значения индекса зафиксированы на участке ближе к центру водохранилища. Как отмечалось в работе [13], причинами повышенной мутности воды могут быть: присутствие тонкодисперсных неорганических взвесей и соединений, наличие органических примесей или живых организмов, а также коллоиды, которые образуются при окислении соеди-

нений железа и марганца. При полевых наблюдениях на этом участке акватории мы отмечали заросли высших водных растений. В целом, можно отметить уменьшение мутности воды при продвижении от верховья Омутнинского водохранилища к его приплотинному участку. Подобная закономерность отмечена нами и на других снимках, сделанных в летний период.

Заключение

Изменение трофического состояния Омутнинского водохранилища за период с 2011 по 2019 гг. и его переход от мезотрофного к эвтрофному типу свидетельствуют об увеличении интенсивности эвтрофирования данного водоёма, что выражается в увеличении биологической продуктивности водного объекта. Согласно данным ДЗЗ, наиболее подвержены эвтрофированию мелководные участки в центральной части и в верховье водохранилища. На них ежегодно обнаруживаются заросли высших водных растений. В центральной и приплотинной частях отмечается «цветение» воды. Расчёт спектральных индексов концентрации хлорофилла *a* и мутности позволило дистанционно выявить пространственное распределение по акватории зарослей водных растений. Данный метод может быть использован в дальнейшем при проведении экологического мониторинга Омутнинского водохранилища и других водоёмов региона.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-86.2019.5).

Литература

1. Мирненко Э.И. Особенности эвтрофирования Нижнекальмиусского водохранилища // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2019. № 3–4. С. 24–30.
2. Khorasani H., Kerachian R., Malakpour-Estalaki S. Developing a comprehensive framework for eutrophication management in off-stream artificial lakes // Journal of Hydrology. 2018. V. 562. P. 103–124.
3. Suo A., Zhang M. Sea areas reclamation and coastline change monitoring by remote sensing in coastal zone of Liaoning in China // Journal of Coastal Research. 2015. Special Issue 73 – Recent Developments of Port and Ocean Engineering. P. 725–729.
4. Xu N. Detecting coastline change with all available Landsat data over 1986–2015: A case study for the State of Texas, USA // Atmosphere. 2018. V. 9. P. 107.

5. Campbell W.J., Weeks W.F., Ramseier R.O., Gloersen P. Geophysical studies of floating ice by remote sensing // *Journal of Glaciology*. Access. 1975. V. 15. No. 73. P. 305–328.

6. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // *Sensors (Basel)*. 2018. V. 18. No. 1. P. 91.

7. Навроцкий В.В., Дубина В.А., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф. Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в заливе Петра Великого (Японское море) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 158–170.

8. Anttila S., Fleming-Lehtinen V., Attila J., Junttila S., Alasalmi H., Hällfors H., Kervinen M., Koponen S. A novel earth observation based ecological indicator for cyanobacterial blooms // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 64. P. 145–155.

9. Wang G., Lee Z., Mouw C. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: A regional example in the Western Basin of Lake Erie // *Remote Sens.* 2017. V. 9. P. 1309.

10. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В. Применение комплекса наземных методов исследования для диагностики загрязнения и процессов эвтрофирования водохранилищ Кировской области // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 2. С. 44–52.

11. Неверова-Дзюпак Е.В., Цветкова Л.И., Макарова С.В., Киселев А.В. Об экологической безопасности водных объектов // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 3. С. 136 [Электронный ресурс] <https://www.science-education.ru/pdf/2012/3/229.pdf> (Дата обращения: 13.02.2020).

12. Цветкова Л.И., Неверова-Дзюпак Е.В. Как оценить опасный уровень антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 6 (77). С. 262–270.

13. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища // *Вестник ТвГУ. Серия «Химия»*. 2016. № 2. С. 230–244.

14. Розумная Л.А. Антропогенная эвтрофикация пресноводных озёр средней полосы России // *Достижения науки и техники АПК*. 2011. № 2. С. 78–80.

References

1. Mirnenko E.I. Features of the eutrophication of the Nizhnekalmius reservoir // *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogennogo regiona*. 2019. No. 3–4. P. 24–30 (in Russian).

2. Khorasani H., Kerachian R., Malakpour-Estalaki S. Developing a comprehensive framework for eutrophication management in off-stream artificial lakes // *Journal of Hydrology*. 2018. V. 562. P. 103–124. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.052

3. Suo A., Zhang M. Sea areas reclamation and coastline change monitoring by remote sensing in coastal zone of Liaoning in China // *Journal of Coastal Research*. 2015. Special Issue 73 – Recent Developments of Port and Ocean Engineering. P. 725–729. doi: 10.2412/SI73-124.1

4. Xu N. Detecting coastline change with all available Landsat data over 1986–2015: A case study for the State of Texas, USA // *Atmosphere*. 2018. V. 9. P. 107. doi: 10.3390/atmos9030107

5. Campbell W.J., Weeks W.F., Ramseier R.O., Gloersen P. Geophysical studies of floating ice by remote sensing // *Journal of Glaciology*. Access. 1975. V. 15. No. 73. P. 305–328. doi: 10.3189/S0022143000034456

6. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // *Sensors (Basel)*. 2018. V. 18. No. 1. P. 91. doi: 10.3390/s18010091

7. Navrotsky V.V., Dubina V.A., Pavlova E.P., Khrapchenkov F.F. Analysis of satellite observations of chlorophyll concentration in Peter the Great Bay (Sea of Japan) // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. No. 1. P. 158–170 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170

8. Anttila S., Fleming-Lehtinen V., Attila J., Junttila S., Alasalmi H., Hällfors H., Kervinen M., Koponen S. A novel earth observation based ecological indicator for cyanobacterial blooms // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 64. P. 145–155. doi: 10.1016/j.jag.2017.09.007

9. Wang G., Lee Z., Mouw C. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: A regional example in the Western Basin of Lake Erie // *Remote Sens.* 2017. V. 9. P. 1309. doi: 10.3390/rs9121309

10. Kutyavina T.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V. Application of ground-based research methods for the diagnostics of pollution and eutrophication of water reservoirs of the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 44–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052

11. Neverova-Dziopak E.V., Tsvetkova L.I., Makarova S.V., Kiselev A.V. On the environmental safety of water bodies // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 3. P. 136 [Internet resource] <https://www.science-education.ru/pdf/2012/3/229.pdf> (Accessed: 13.02.2020) (in Russian).

12. Tsvetkova L.I., Neverova-Dziopak E.V. How to assess the dangerous level of anthropogenic eutrophication of freshwater ecosystems // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019. No. 6 (77). P. 262–270 (in Russian).

13. Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Using Landsat 8 (OLI) sensor data to measure turbidity, color, and chlorophyll content in the water of the Ivankovo reservoir // *Vestnik TvGU. Seriya Khimiya*. 2016. No. 2. P. 230–244 (in Russian).

14. Rozumnaya L.A. Anthropogenic eutrophication of freshwater lakes in central Russia // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2011. No. 2. P. 78–80 (in Russian).

Ecological features of cyanobacteria and algae communities of the littoral of the meromictic Lake Shira (Khakassia Republic, Russia)

© 2020. L. A. Gaysina^{1,2}

A. I. Fazlutdinova¹ ORCID: 0000-0001-7971-6690, O. N. Mukhina¹ ORCID: 0000-0002-4028-9916
 L. F. Akhmadeyeva¹ ORCID: 0000-0002-6471-3929, D. Yu. Rogozin^{3,4} ORCID: 0000-0002-9350-2936
 A. O. Bul'khin^{3,4} ORCID: 0000-0002-8537-0945, N. V. Sukhanova¹ ORCID: 0000-0002-6130-6172

J. R. Johansen⁵ ORCID: 0000-0002-0794-9417

¹M. Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
 3-a, Okt'yabrskoy revolyucii, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, 450008,
²All-Russian Research Institute of Phytopathology,
 5, Institute St., B. Vyazyomy, Odintsovo District, Moscow Region, Russia, 143050,
³Institute of Biophysics Siberian Branch of RAS,
 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
⁴Siberian Federal University,
 79, Svobodny Prospekt, Krasnoyarsk, Russia, 660041,
⁵John Carroll University, University Heights,
 John Carroll Blvd., Ohio 44118, USA,
 e-mail: lira.gaisina@mail.ru

During the study of cyanobacteria and algae from littoral of the meromictic Lake Shira (Republic of Khakassia, Russia) forty-eight taxa were identified: Cyanobacteria – 7, Chlorophyta – 5, and Bacillariophyta – 36 species. Cyanobacteria were represented by cosmopolitan taxa *Leptolyngbya voronichiniana*, cf. *Trichocoleus hospitus* and widely distributed in the freshwater ecosystems species *Phormidium* cf. *paulsenianum*, *Pseudophormidium* cf. *golenkinianum*, *P. pauciramosum*, *Leptolyngbya perforans*, and *L. subtilissima*. Among green algae typical freshwater taxa *Chloroidium saccharophilum*, *Desmodesmus abundans*, *Oocystis lacustris*, *Chlorella* sp., *Stigeoclonium* sp. were detected. Among Bacillariophyta the most frequent species were *Amphora ovalis*, *Cymbella affinis*, *Encyonema silesiacum*, *Eunotia fallax*, *Gomphonella olivacea*, *G. parvulum*, *Kobayasiella subtilissima*, *Navicula minima*, *N. radiosa*, *N. veneta*, *Nitzschia fonticola*, *N. palea*, *Grunowia tabellaria*, *Surirella undulata*. Several rare species cf. *Fragilaria tenera*, *Grunowia tabellaria* and cf. *Ulnaria capitata* were found. In relation to mineralization indifferents was the largest group (73%). In relation to pH, a unique feature of the investigated lake was the predominance of alkaliphilic species of diatoms (56%), such as *Amphora ovalis*, *Cymbella affinis*, *Gomphonema truncatum*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula minima*, *N. veneta*, *Nitzschia* cf. *linearis*, *N. palea*, *Planothidium lanceolatum* and other. In the geographic structure cosmopolitan group included 25 species (69%), boreal group – 4 species (11%), arcto-alpine group – 2 species (6%). To obtain more accurate information on the biodiversity of cyanobacteria and algae of Lake Shira further studies using molecular-genetic and electron microscopic methods are needed.

Keywords: meromixia, Bacillariophyta, alkaliphilic species, *Leptolyngbya voronichiniana*, *Pseudophormidium pauciramosum*, *Desmodesmus abundans*, *Oocystis lacustris*, *Amphora ovalis*, *Grunowia tabellaria*, *Surirella undulata*.

УДК 574.58

Экологические особенности цианобактериально-водорослевых сообществ литорали меромиктического озера Шира (Республика Хакасия, Россия)

© 2020. Л. А. Гайсина¹, д. б. н., доцент, зав. кафедрой,

А. И. Фазлутдинова¹, к. б. н., доцент, О. Н. Мухина¹, магистрант,

Л. Ф. Ахмадеева¹, магистрант, Д. Ю. Рогозин^{3,4}, д. б. н., в. н. с.,

А. О. Бульхин^{3,4}, аспирант, Н. В. Суханова¹, д. б. н., доцент, проректор,

Д. Р. Джохансен⁵, доктор биологии, профессор,

¹Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 450008, Россия, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, д. 3-а,

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии,
143050, Россия, Московская область, Одинцовский район,
р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, д. 5,

³ Институт Биофизики СО РАН,
660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50,

⁴Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79,

⁵ Университет Джона Кэрролла,
44118, США, Кливленд, Норт Парк бульвар, 20700,
e-mail: lira.gaisina@mail.ru

При изучении цианобактерий и водорослей литорали меромиктического озера Шира (Республика Хакассия, Россия) было обнаружено сорок восемь таксонов: Cyanobacteria – 7, Chlorophyta – 5, Bacillariophyta – 36 видов. Цианобактерии были представлены космополитами *Leptolyngbya voronichiniana*, cf. *Trichocoleus hospitus* и широко распространёнными в пресноводных экосистемах видами *Phormidium* cf. *paulsenianum*, *Pseudophormidium* cf. *golenkinianum*, *Pseudophormidium pauciramosum*, *Leptolyngbya perforans* и *L. subtilissima*. К зелёным водорослям относились также типично пресноводные виды и роды *Chloroidium saccharophilum*, *Desmodesmus abundans*, *Oocystis lacustris*, *Chlorella* sp., *Stigeoclonium* sp. Среди представителей отдела Bacillariophyta наиболее часто встречались виды *Amphora ovalis*, *Cymbella affinis*, *Encyonema silensiacum*, *Eunotia fallax*, *Gomphonella olivacea*, *G. parvulum*, *Kobayasiella subtilissima*, *Navicula minima*, *N. radiosa*, *N. veneta*, *Nitzschia fonticola*, *N. palea*, *Grunowiata bellaria*, *Surirella undulata*. Было обнаружено также несколько редких видов cf. *Fragilaria tenera*, *Grunowiata bellaria* и cf. *Ulnariacapitata*. По отношению к минерализации наиболее многочисленной была группа видов-индифферентов (73%). По отношению к рН уникальной чертой изученного озера было преобладание алкалофильных видов (56%), таких как *Amphora ovalis*, *Cymbella affinis*, *Gomphonema truncatum*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula minima*, *N. veneta*, *Nitzschia* cf. *linearis*, *N. palea*, *Planothidium lanceolatum* и др. Для получения более точной информации о биоразнообразии цианобактерии и водорослей озера Шира необходимы дальнейшие исследования с использованием молекулярно-генетических и электронно-микроскопических методов.

Keywords: меромиксия, Bacillariophyta, алкалофильные виды, *Leptolyngbya voronichiniana*, *Pseudophormidium pauciramosum*, *Desmodesmus abundans*, *Oocystis lacustris*, *Amphora ovalis*, *Grunowia tabellaria*, *Surirella undulata*.

Meromictic lakes are characterized by a long-term stratification of the water column – meromixia that often causes accumulation of nutrients in the bottom layers of water bodies. This phenomenon affects living organisms [1]. It should be noted, that despite quite a number of publications on meromictic lakes [2–5], insufficient data about cyanobacteria and algae compositions in this type of water bodies exist.

Lake Shira is located in the north of the Republic of Khakassia (Russia). It is a brackish water body with sulfate-chloride-sodium-magnesium mineral composition [6, 7]. Average salinity in mixolimnion (upper water layer) during the summer stratification period in 2002–2017 years was approximately 15 g/L, and in monimolimnion it was approximately 19 g/L [4]. Despite the uniqueness of Lake Shira, the biodiversity of cyanobacteria and algae in this reservoir remains unstudied. The aim of this work was to study the biodiversity and ecology of cyanobacterial and algal communities in the littoral zone of Lake Shira.

Material and methods

Samples were taken from the littoral of the lake (to a depth of 1 m) on October 21, 2018 by

simply scooping them into 5 L plastic bottles. Pebbles and sand from a depth about 0.5 m were also added into the water sample.

For isolation of clonal cultures of cyanobacteria and algae dilution technique was used [9]. Isolates were cultivated on solidified Z8 medium [10] at room temperature 20–25 °C on with illumination of 40 μmol/m² per second provided by 18W cool fluorescent tubes with 12h:12h light:dark regime. Pure cultures in tubes on 1.5% agar-solidified media slants were then stored at 4 °C in a refrigerator with transparent door at natural daylight regime. Observations of cyanobacteria were conducted using a Zeiss Axio Imager A2 microscope with DIC optics and AxioVision 4.9 visualization system. Microphotographs were taken with an Axio Cam MRc camera on magnifications ×400 and ×1000. For identification of the taxa and classification, the relevant reference sources were used [11–17]. For clarification the names of cyanobacteria and algae the Algaebase database was used [18].

Results and Discussion

Forty-six taxa were identified: Cyanobacteria – 7, Chlorophyta – 5, Bacillariophyta – 36 species.

Among cyanobacteria cosmopolitan taxa *Leptolyngbya voronichiniana* Anagnostidis & Komárek and cf. *Trichocoleus hospitus* (Hansgirg ex Gomont) Anagnostidis were detected. Besides *Phormidium* cf. *paulsenianum* J.B. Petersen (Fig., 1, see color insert), *Pseudophormidium* cf. *golenkianum* (Gomont) Anagnostidis (Fig., 2), *P. pauciramosum* (Anissimova) Anagnostidis, *Leptolyngbya perforans* (Geitler) (Fig., 3) Anagnostidis & Komárek, и *L. subtilissima* (Kützing ex Hansgirg) Komárek in Anagnostidis (Fig., 4) were found. The latter two species are typical inhabitants of the littoral zone of the freshwater bodies [12].

Green algae comprised taxa characterized by a wide distribution in freshwater ecosystems: *Chloroidium saccharophilum* (W. Krüger) Darienko, Gustavs, Mudimu, Menendez, Schumann, Karsten, Friedl & Proschold, *Desmodesmus abundans* (Kirchner) E. H. Hegewald, *Oocystis lacustris* Chodat (Fig., 5), *Chlorella* sp., *Stigeoclonium* sp. (Fig., 6).

Bacillariophyta was the most diverse group. In total, 36 species and intraspecific taxa of diatoms were found in this lake. Among them are representatives of the common freshwater genera – *Achnanthis* Kützing, *Amphora* Ehrenberg ex Kützing, *Cocconeis* Ehrenberg, *Cymbella* C. Agardh, *Eunotia* Ehrenberg, *Fragilaria* Lyngbye, *Gomphonema* Ehrenberg, *Hantzschia* Grunow, *Navicula* Bory, *Nitzschia* Hassall, *Pinnularia* Ehrenberg, *Staurosira* Ehrenberg, *Surirella* Turpin, and *Ulnaria* (Kützing) Compère.

Lake Shira is characterized by intensive growth of diatoms, but biodiversity of this group was not very high. The most abundant species were *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing, *Cymbella affinis* Kützing, *Encyonema silesiacum* (Bleisch) D.G. Mann, *Eunotia fallax* A. Cleve, *Gomphonella olivacea* (Hornemann) Rabenhorst, *G. parvulum* (Kützing) Kützing, *Kobayasiella subtilissima* (Cleve) Lange-Bertalot, *Navicula minima* Grunow (Fig., 7), *N. radiosa* Kützing, *N. veneta* Kützing, *Nitzschia fonticola* (Grunow) Grunow, *N. palea* (Kützing) W. Smith, *Grunovia tabellaria* (Grunow) Rabenhorst (Fig., 8), *Surirella undulata* (Ehrenberg) Ehrenberg (Fig., 9). Species *Amphora libyca* Ehrenberg, *Diploneis* cf. *modicahassica* H. Lange-Bertalot & A. Fuhrmann, *Nitzschia sinuata* var. *delognei* (Grunow) Lange-Bertalot, *Karayevia clevei* (Grunow) Bukhtiyarova, *Planothidium lanceolatum* (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot, *Staurosira construens* Ehrenberg (Fig., 10) were sporadic.

Several rare species of diatoms were found: cf. *Fragilaria tenera* (W. Smith) Lange-Bertalot,

Grunovia tabellaria, cf. *Ulnaria capitata* (Ehrenberg) Compère.

In relation to mineralization, two groups were distinguished: indifferent and halophobe species. Indifferent taxa comprised the largest group (73%) while the halophobes encountered only three species living in slightly salted reservoirs: *Craticula submolesta* (Hustedt) Lange-Bertalot, *Eunotia fallax* (Fig., 11) и cf. *Fragilaria tenera* (W. Smith) Lange-Bertalot.

The diatoms species, which were found in the littoral zone of Lake Shira, were adapted to different life condition and included bottom, planktonic, littoralic, epiphytic-littoral and epiphytic species. Among these the bottom and epiphytic species were the most numerous (47 and 28%, respectively). The epiphytic-littoral group included 14% of the species, 6% of species belong to littoralic group and 3% of species belong to planktonic group.

In relation to pH several ecological groups were found. A unique feature of the investigated lake was the predominance of alkaliphilic diatoms species (56%) such as *Achnanthes conspicua* Ant. Mayer, *Amphora ovalis*, *A. libyca*, *Cocconeis placentula* Ehrenberg, *Cymbella affinis*, *Gomphonema truncatum* (Fig., 12), *Fragilaria tenera*, *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow, *Navicula veneta*, *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith, *Fragilaria ulna* (Nitzsch) Lange-Bertalot, *Ulnaria delicatissima* (W. Smith) Aboal & P. C. Silva. Indifferent to pH species like *Achnanthis linearis* W. Smith, *Gomphonema parvulum*, *Navicula radiosa* Kützing, and *Pinnularia montium* Y. Liu, Kociolek & Q.X. Wang were also found (14%). *Eunotia fallax*, *Kobayasiella subtilissima*, *Craticula submolesta* belong to acidophilic species (8%), *Gomphonella olivacea* and *Nitzschia fonticola* – to alkalibiont species (6%).

The geographic structure of the composition of diatoms in the studied lake also has its own specificity. The most abundant were cosmopolitan species – 25 species and interspecific taxon (69%), including *Amphora ovalis*, *Cocconeis placentula*, *Eunotia fallax*, *Fragilaria ulna*, *Gomphonema parvulum*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula minima*, *N. veneta*, *Nitzschia fonticola*, *N. linearis*, *N. palea*. Boreal group were represented by 4 species (11%) – *Achnanthes conspicua*, *Diploneis* cf. *modicahassica*, *Gomphonella olivacea*, *Navicula radiosa*. Two species (6%) – *Grunovia tabellaria* and cf. *Fragilaria tenera* – belong to arcto-alpine group.

Conclusion

Thus, a preliminary analysis of the species composition of the cyanobacterial algal com-

munities of the littoral of Shira Lake revealed the predominance of diatoms. To obtain more accurate information on the biodiversity of cyanobacteria and algae of Lake Shira further studies using molecular-genetic and electron microscopic methods are needed.

The study was supported by Russian Foundation for Basic Research in the frame of project 19-05-00428 and an internal grant of M. Akmullah Bashkir State Pedagogical University for the year 2019. This article is published with financial support from the RFBR grant No. 19-04-20031.

References

1. Rogozin D.Yu. Meromictic lakes of the North Minusinsk depression: patterns of stratification and ecology of phototrophic sulfur bacteria. Krasnoyarsk: IF SB RAS, 2018. 230 p. (in Russian).
2. Miracle M.R., Vicente E., Pedrós-Alió C. Biological studies of Spanish meromictic and stratified karstic lakes // *Limnetica*. 1992. V. 8. P. 59–77.
3. Verschuren D., Cocquyt C., Tibby J., Roberts C.N., Leavitt P.R. Long-term dynamics of algal and invertebrate communities in a fluctuating tropical soda lake // *Limnology and Oceanography*. 1999. V. 44. P. 1216–1231.
4. Schouten S., Rijpstra W.I.C., Kok M., Hopman E.G., Summons R.E., Volkman J.K., Sinninghe Damme J.S. Molecular tracers of biogeochemical processes in a saline meromictic lake (Ace Lake) // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. P. 1629–1640.
5. Laugaste R., Reunanen M. The composition and density of epiphyton on some macrophyte species in the partly meromictic Lake Verevi // *Developments in Hydrobiology*. 2005. V. 182. P. 137–150.
6. Parnachev V.P., Degermendzhy A.G. Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakassia, Southern Siberia // *Aquatic Ecology*. 2002. V. 36. No. 2. P. 107–122.
7. Kalacheva G.S., Zhila N.O., Volova T.G. Lipid and hydrocarbon compositions of a collection strain and a wild sample of the green microalga *Botryococcus* // *Aquatic Ecology*. 2002. V. 36. P. 317–330.
8. Rogozin D.Yu., Trusova M.Yu., Khromechek E.B., Degermendzhi A.G. Microbial community of the chemocline of the meromictic Lake Shunet (Khakassia, Russia) during summer stratification // *Microbiology (Moscow)*. 2010. V. 79. No. 2. P. 253–261.
9. Bohunická M., Pietrasiak N., Johansen J.R., Berrendero-Gómez E., Hauer T., Gaysina L.A., Lukešová A. *Roholtiella*, gen. nov. (Nostocales, Cyanobacteria) – a tapering and branching cyanobacteria of the family Nostocaceae // *Phytotaxa*. 2015. V. 197. No. 2. P. 084–103. doi: 10.11646/phytotaxa.197.2.2
10. Carmichael W.W. Isolation, culture, and toxicity testing of toxic freshwater cyanobacteria (blue-green algae) / Ed. V. Shilov. Fundamental research in homogenous catalysis 3. New York: Gordon & Breach, 1986. P. 1249–1262.
11. Komárek J., Fott B. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Chlorococcales / Eds. H.-J. Elster, W. Ohle. Die Binnengewässer XVI. Stuttgart: Schweizerbart Verlag, 1983. 1044 p. (in German).
12. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2nd Part: Oscillatoriales / Ed. B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner, M. Shagerl. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bd. 19/2. München, Spektrum Akademische Verlag, Elsevier GmbH, 2005. 759 p. (in German).
13. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1: Naviculaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, New-York: VEB Gustav Fischer Verlag, 1986. Bd. 2. 876 p. (in German).
14. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1988. Bd. 2. 536 p. (in German).
15. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 3: Centrales; Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1991. Bd. 2. 576 p. (in German).
16. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 4: Ahnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1991. Bd. 2. 437 p. (in German).
17. Lange-Bertalot H., Krammer K. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Neue und wenig bekannte Taxa, neue Kombinationen und Synonyme sowie Bemerkungen und Ergänzungen zu den Naviculaceae // *Bibliotheca Diatomologica*. 1987. V. 15. P. 1–289 (in German).
18. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2019 [Internet recourse] <http://www.algaebase.org> (Accessed: 16.11.2019).

L. A. Gaysina, A. I. Fazlutdinova, O. N. Mukhina, L. F. Akhmadeyeva, D. Yu. Rogozin, A. O. Bul'khin,
 N. V. Sukhanova, J. R. Johansen "Ecological features of cyanobacteria and algae communities
 of the littoral of the meromictic Shira Lake (Khakassia Republic, Russia)", P. 47

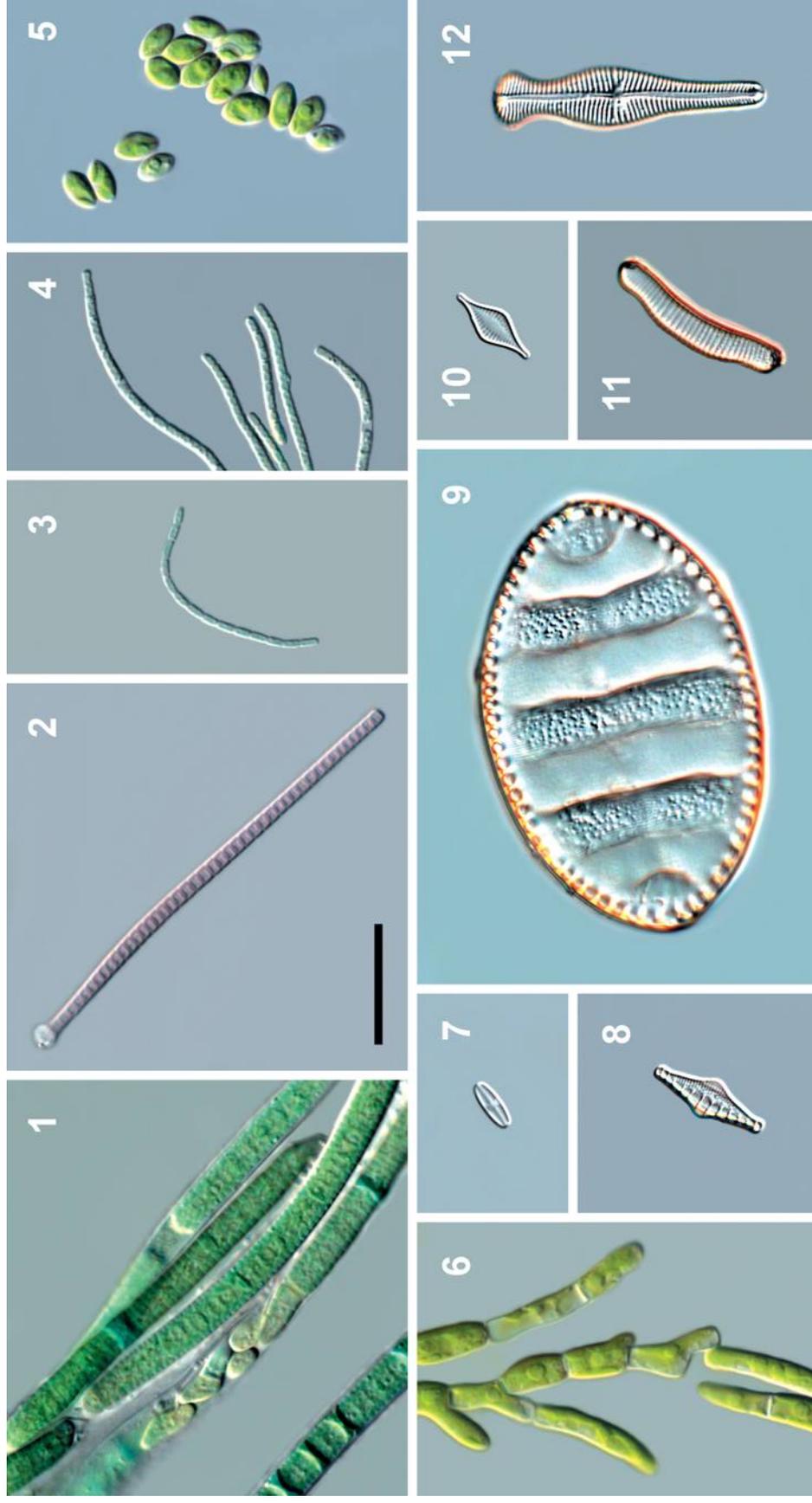


Fig. Cyanobacteria and algae of the littoral zone of Lake Shira: 1 – *Phormidium* cf. *paulsenianum*; 2 – *Pseudophormidium* cf. *golenkinianum*;
 3 – *Leptolyngbya perforans*; 4 – *L. subtilissima*; 5 – *Oocystis lacustris*; 6 – *Stigeoclonium* sp.; 7 – *Navicula minima*; 8 – *Grunowia tabellaria*;
 9 – *Surirella undulata*; 10 – *Staurosira construens*; 11 – *Gomphonema truncatum*. Scale bar is 10 μ m length

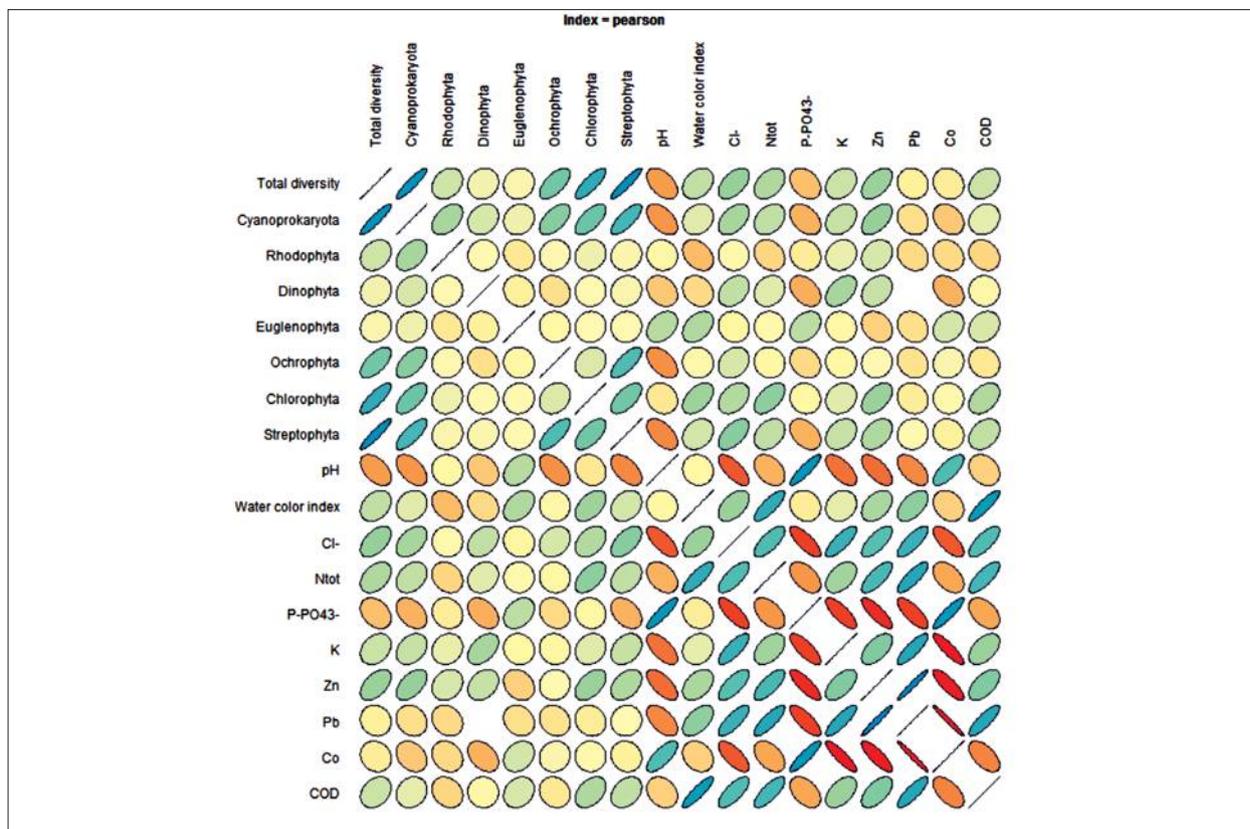


Рис. 1. Графическое представление коэффициента корреляции Пирсона для таксономического разнообразия водорослей и гидрохимических показателей исследованных водоёмов. В столбцах исследованные гидрохимические параметры и отделы водорослей. Синие оттенки отображают положительную корреляцию, красные и оранжевые – отрицательную. Размер эллипса показывает степень взаимного влияния показателей друг на друга: чем уже диск, тем сильнее корреляция

Fig. 1. A graphical representation of the Pearson correlation coefficient for the taxonomic diversity of algae and hydrochemical parameters of the studied reservoirs. In the columns investigated hydrochemical parameters and phylums of algae. Blue shades indicate a positive correlation, red and orange – negative one. The size of the ellipse shows the degree of mutual influence of indicators on each other: the narrower the disk, the stronger the correlation

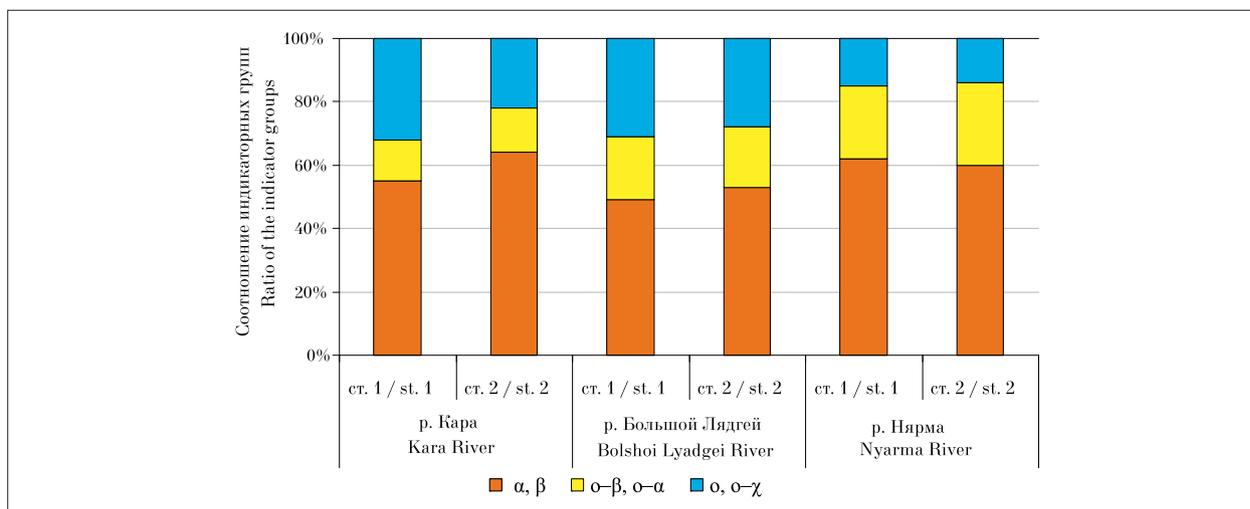


Рис. 2. Соотношение индикаторных групп водорослей на фоновых и импактных участках рек (ст. 1 – фоновые, ст. 2 – загрязнённые участки): α – альфамезосапробы, α-β – альфа-бетамезосапробы, β – бетамезосапробы, o – олигосапробы, o-α – олиго-альфамезосапробы, o-β – олиго-бетамезосапробы, o-χ – олиго-ксеносапробы

Fig. 2. The ratio of the algae indicator groups in the background and impact parts of the rivers (st. 1 – background, st. 2 – impact sites): α – alpha-mesosaprobies, α-β – alpha-beta-mesosaprobies, β – beta-mesosaprobies, o – oligosaprobies, o-α – oligo-alpha-mesosaprobies, o-β – oligo-beta-mesosaprobies, o-χ – oligo-xenosaprobies

Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution

© 2020. S. Barinova ORCID: 0000-0001-9915-2503

Institute of Evolution, University of Haifa,

199, Abba Khoushi Avenue, Mount Carmel, Haifa, Israel, 3498838,

e-mail: sophia@evo.haifa.ac.il

The article describes the distribution of the diversity of cyanobacteria in 51 Eurasian floras in the gradient of environmental factors. Environmental factors in order to analyze the strength of their impact on the community of cyanobacteria were divided into two main groups. The first group represents local factors that are distinguished by the instability of exposure, short duration, and wide amplitude. This group includes organic and toxic anthropogenic pollution and temperature. They are related to the seasonality and the intensity of using the catchment area. Cyanobacteria increases in productivity but reduces the species richness in the gradient of increasing influence of the first group of factors. The second group combines factors of global long-term macroecological stability associated with the latitude and altitude of the aquatic habitat. We took for analysis cyanobacterial floras in a latitudinal gradient from Israel to the Arctic, as well as in a gradient of height from 4 to 4213 m above sea level in the Caucasus and the Pamir. A group of global climatic factors, such as a decrease in the average annual temperature at high latitudes, an increase in insolation at high altitudes, has a stimulating effect on the diversity of cyanobacteria and at the same time increases their intraspecific variability. The index of intraspecific variation (Ssp/Sp Index) increase in the gradient of the latitude of habitat and altitude that indicates the release of intraspecific variability and can serve as an indicator of climatic stress and the surviving of cyanobacteria under climatic instability and local pollution.

Keywords: Cyanobacteria, species richness, climatic gradients, altitude, pollution, Eurasia.

УДК 581.5

Экологические предпочтения цианобактерий в градиенте макроклиматических факторов и загрязнения

© 2020. С. Баринава, к. б. н., профессор,

Университет Хайфы, Институт эволюции,

199, проспект Абба Хуши, гора Кармель, Хайфа, Израиль, 3498838,

e-mail: sophia@evo.haifa.ac.il

В статье описывается распределение разнообразия цианопрокариот в 51 евразийской флоре, как части водного сообщества, в градиенте факторов окружающей среды. Факторы среды в целях анализа силы их воздействия на сообщества цианобактерий были разделены на две основные группы. Первая группа представляет собой факторы, которые отличаются нестабильностью проявления, короткой продолжительностью и широкой амплитудой. К этой группе отнесены локальные факторы, такие как органическое и токсическое антропогенное загрязнение, а также температура, которые связаны с сезонностью и характером местного климата и интенсивностью использования площади водосборного бассейна. Первая группа факторов повышает продуктивность цианобактерий, но уменьшает богатство видов в градиенте усиления воздействия. Вторая группа объединяет факторы глобальной долгосрочной макроэкологической стабильности, связанные с широтностью и высотностью местообитания. Для анализа были взяты флоры цианобактерий в широтном градиенте от Израиля до Арктики, а также в градиенте высоты от 4 до 4213 м над уровнем моря на Кавказе и Памире. Окалось, что цианобактерии реагируют на изменения глобальных климатических факторов, таких как снижение среднегодовой температуры в высоких широтах, и увеличение инсоляции на больших высотах. Эти факторы оказывают стимулирующее влияние на разнообразие цианобактерий и в то же время увеличивают их внутривидовую изменчивость. Ранее нами разработан индекс внутривидовой изменчивости (Индекс Ssp/Sp), рассчитываемый на основе известного видового богатства флоры водорослей и цианобактерий (Sp) и числа присутствующих в списке флоры таксонов рангом ниже вида (Ssp). В результате расчётов и анализа было выявлено возрастание индекса в градиенте широты местообитания и высоты над уровнем моря, что свидетельствует о высвобождении внутривидового полиморфизма на границе ареала и может служить индикатором климатического стресса и выживания цианобактерий в условиях климатической нестабильности и локального загрязнения.

Ключевые слова: цианобактерии, видовое богатство, климатические градиенты, высота над уровнем моря, загрязнение, Евразия.

The factors affecting the species richness of cyanobacteria and the quantitative indicators of their communities can be divided into two main groups: 1) on local scale like a reservoir or basin of a small river, and 2) on global scale like a large administrative or floristic region, a large river basin, and a part of the continent. In the first case, to determine the degree of reaction of the communities of cyanobacteria, beta- and alpha-diversity are analyzed. In the second case, diversity is combined from large floristic or geographical regions, and alpha- and gamma-diversity can be analyzed. Factors of the first group, such as local water temperature, nutrient saturation, are represent a group of rapidly changing indicators with a large amplitude. At the same time, macroclimatic factors can be considered relatively stable compared to the scale of development of algal communities.

Factors such as the latitude or altitude gradient [1] are associated not only with the main climatic characteristics but also with key players in the formation of biota diversity factors that were established at the current stage of biome evolution. The study of the diversity of cyanobacteria of continental water bodies and the patterns of response of their communities to the influence of various factors, both local and macroclimatic, was the aim of this work.

The aim of present work was the identification of the response of cyanobacterial communi-

ties in water bodies of various regions in Eurasia to the climatic and local state of its habitats in latitude and altitude gradients using comparative floristic and new statistical methods.

Material and Methods

The material for this study comes from our own and with the co-authors long-term studies in rivers and lakes of Eurasia [2, 3] (Fig. 1). A total of 95 floras were studied, with 2985 taxa, among them 70 floras contain cyanobacteria. The studied algal diversity for current analysis included 599 genera from 51 floras.

The main approach to the analysis of data on the floristic diversity of algae, including cyanobacteria, was made from [3] to determine the main models for the distribution of species richness by climatic and local environmental gradients.

Similarity calculation was performed using the BioDiversity Pro 2.0 program and network analyses in JASP on the botnet package in R Statistica package of [4].

Results and Discussion

We revealed 92 genera of cyanobacteria in 51 Eurasian aquatic floras. There is represented of 23 flora contains 17 genera with more than 3 species, and 16 floras contain 10 species-rich common cyanobacterial genera (Table 1).



Fig. 1. Studied algal floras in the waterbodies of Eurasia

Table 1

Ten most species rich cyanobacteria genera in studied aquatic floras of Eurasia.
Abbreviated: FE – Russian Far East; IS – Israel; TJ – Pamir; Si – Siberia;
STJ – South Tajik depression, Panj River tributaries basin

Genus	FE-1	FE-3	FE-5	FE-9	FE-11	IS-1	IS-2	TJ-1	TJ-2	TJ-3	TJ-4	TJ-5	Si-1	STJ-4	STJ-5	STJ-6
<i>Phormidium</i>	0	6	3	0	1	1	16	4	4	5	3	4	4	10	3	4
<i>Oscillatoria</i>	4	1	1	0	0	3	14	9	13	10	12	7	3	4	0	0
<i>Microcystis</i>	5	7	2	3	12	7	9	4	3	3	3	2	5	3	2	1
<i>Merismopedia</i>	2	4	4	1	3	6	5	4	2	2	4	5	3	6	4	5
<i>Gloeocapsa</i>	2	1	0	0	2	0	6	6	3	4	5	6	0	7	1	2
<i>Dolichospermum</i>	0	3	2	5	6	2	0	2	4	3	3	1	0	1	1	1
<i>Chroococcus</i>	0	3	1	0	7	1	7	1	2	1	2	2	2	1	0	1
<i>Aphanotece</i>	1	5	1	4	4	1	8	2	2	0	2	1	1	1	0	0
<i>Aphanocapsa</i>	0	4	1	2	6	4	8	1	1	1	1	1	1	1	0	0
<i>Anabaena</i>	6	1	3	5	6	1	4	6	6	6	8	6	3	3	0	1

A diversity of cyanobacteria and its distribution have been studied in various regions with a climatic gradient associated with latitude. The species richness of cyanobacteria and their contribution to algal communities were evaluated at the levels of alpha- and gamma-diversity [5].

Research on such a wide area using observations and experimentation has shown that temperature is one of the most important factors, both local and climatic, and that cyanobacterial communities respond to changes in water temperature, but sometimes this can only be seen through bioindication or floristic analysis. Some studies mentioned that cyanobacteria response to pollution impact could be used as indicators of toxicity in the northern areas [6]. In the boreal region of Eurasia, usually, there are three extremums in the development of algae, one of which is dominated by cyanobacteria, while in the more southern regions it has two, or south to one extremum only [3].

Seasonal fluctuations in environmental parameters and species richness of cyanobacteria can thus be attributed to local dependencies that link algae growth in relation to nutrient levels, temperature, and insolation [1, 3]. Moreover, the last two factors are already global, although on a local scale they appear in a “masked” form.

Thus, the relationship between the species richness of freshwater cyanobacteria in the rivers of Israel and the climatic parameters of the region from north to south in the direction of the temperature gradient and humidity of the climate turned out to be quite distinct. Analysis shows that in a semi-arid and desert climate, the anthropogenic influence (local factors) is masked by the influence of climatic (global

factors and hydrology. Therefore, diversity dramatically decreases from north to south [1, 3]. Figure 2 demonstrate dramatically decreasing of algae species richness after polluted sewage input to the Lower Jordan River and increasing the role of cyanobacteria after local anthropogenic impact on the algae diversity.

Comparison of the algae diversity of the characteristic of the rivers Oren in northern and Zin in southern Israel over a hundred years with trends in temperature and climate humidity showed that the effect of desertification is similar to anthropogenic, provokes an increase in salinity and can degrade the diversity of both cyanobacteria and the entire aquatic community [3]. The use of statistical methods for the algae flora of Israel showed that the species composition was divided into four groups corresponding to mountain, foothill, coastal habitats, and located in the rift valley [3], that is, it corresponds to the climatic characteristics of the studied territory.

The climate affected not only species richness in algal communities, but also such variables as the abundance and biomass of river phytoplankton in the water bodies of Ukraine and Kazakhstan [1, 7, 8]. This suggests that sunlight intensity and ambient temperature are the most important local regulatory factors for models of alpha diversity distribution.

Latitudinal climate change from the boreal region to the Arctic affects the distribution of cyanobacteria [1]. With an increase in climatic loads, their species richness correlated quite clearly with a decrease in the number of ice-free days in the direction of the north of the continent. That is the species richness of cyanobacteria increases in the latitude of the habitat and is asso-

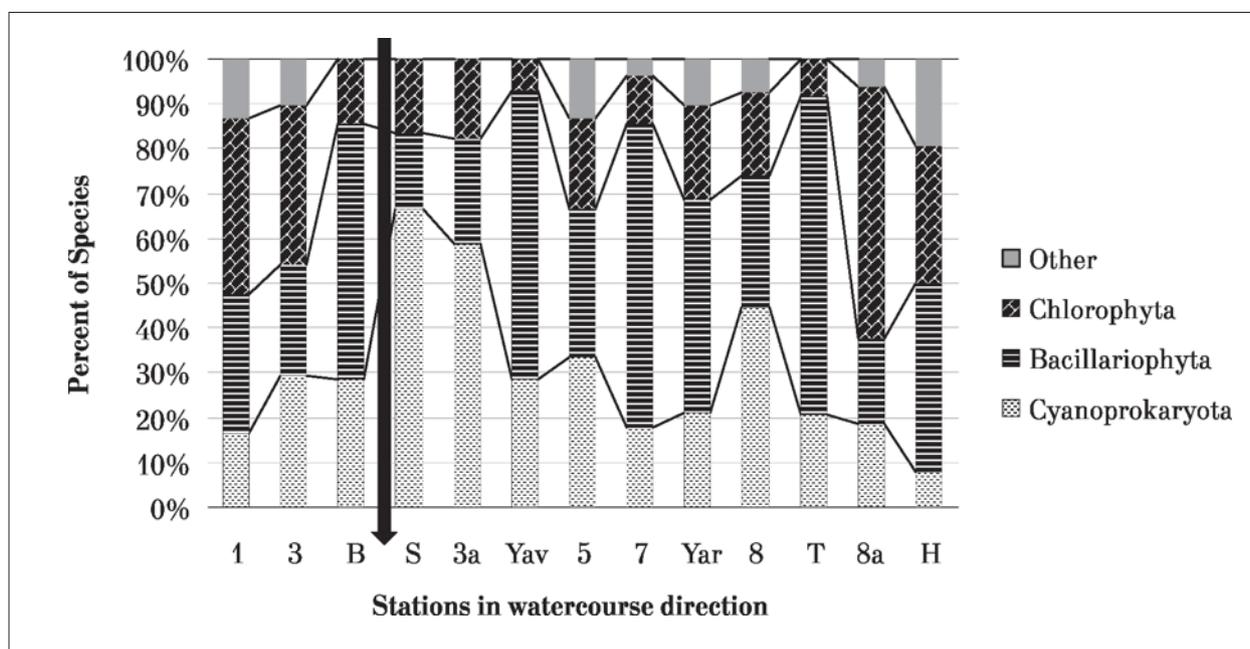


Fig. 2. Distribution of algae and cyanobacteria species in taxonomic divisions and increasing the role of cyanobacteria in the Lower Jordan River under strong anthropogenic impact (black arrow down)

ciated with a decrease in integral insolation, but does not detect a reaction to lower temperatures averaged over the growing season. Consequently, cyanobacteria under climatic stress are more competitive in comparison with algae of other taxonomic Division at high latitudes [1].

One of the widely known natural phenomena is the distribution of biological diversity by habitat altitude [1]. While plant communities are fairly well studied in this regard, the study of the distribution of freshwater algae, including cyanobacteria, is at the initial stage.

To identify patterns of distribution of cyanobacteria, the mountainous countries of the Caucasus (Fig. 3) and the foothills of the Pamirs, as well as in the regions of Kazakhstan and Israel were selected [1]. The results of the analysis showed that the proportion of cyanobacteria increases due to a decrease in the proportion of diatoms and other taxonomic Division of algae from a height of 200 to 2500.

Adding analysis of the diversity of cyanobacteria in the foothills of the Hindu Kush and high mountains of the Pamirs showed a clear trend of an increase in the species richness of cyanobacteria at altitudes from 2500 to 4500 m. That is, with an increase in altitudinal and climatic stress in habitats above 2200 m above sea level, cyanobacteria remain more competitive compared to algae of other Division [1]. At the same time, the distribution of species richness in the regional flora of the high mountain

tributaries of the Indus River according to the height gradient [1] showed a large participation of green algae and cyanobacteria, compared to diatoms.

A significant feature of the taxonomic structure of algae in the water bodies of the southern regions of Eurasia is a large proportion of monomorphic species. Such exceptionally low intraspecific variability may be associated with recent climatic instability and anthropogenic impacts that have destroyed habitat differentiation and contributed to the survival of highly resistant monomorphic populations.

To identify the degree of intraspecific variability, we developed the Ssp/Sp index as the ratio of the number of species, including intraspecific variations (Ssp), to the number of species (Sp) in each algal flora [1]. Thus, the index values in the aquatic flora of the Holarctic increase from south to north, which correlates with global climate changes. At the same time, for cyanobacteria of the high mountain habitats of the Pamirs, as well as the high-latitude Arctic, an increase in the Ssp/Sp index correlates with an increase in climate stress. Figure 4 show the correlation of the cyanobacteria species richness in 51 algal floras of Eurasia. Clusters combined the most similar cyanobacteria floras. The first cluster includes the Pamir high mountain habitats only. Second cluster combine cyanobacteria floras in Russian Far East, mountain Kazakhstan and Israel as well as the floras of

South-Tajik depression habitats in Pamir piedmonts. Cluster 3 represented mostly Russian North habitats and cyanobacterial floras of cold habitats in Russian Far East and mountain Israel and Kazakhstan. Four cluster includes different cyanobacterial floras from lowland habitats of Kazakhstan, Turkey, Georgia, India and South Tajik depression lowlands of the Panj River basin. So, we can see the climatic factors

regulation in the distribution of cyanobacteria species richness in Eurasia.

Therefore, the trend of increasing intraspecific variability in cyanobacterial communities at high altitudes and high latitudes suggests that extreme living conditions play a major role in their polymorphism and may be a mechanism for protecting species from environmental stress for future survival and development.

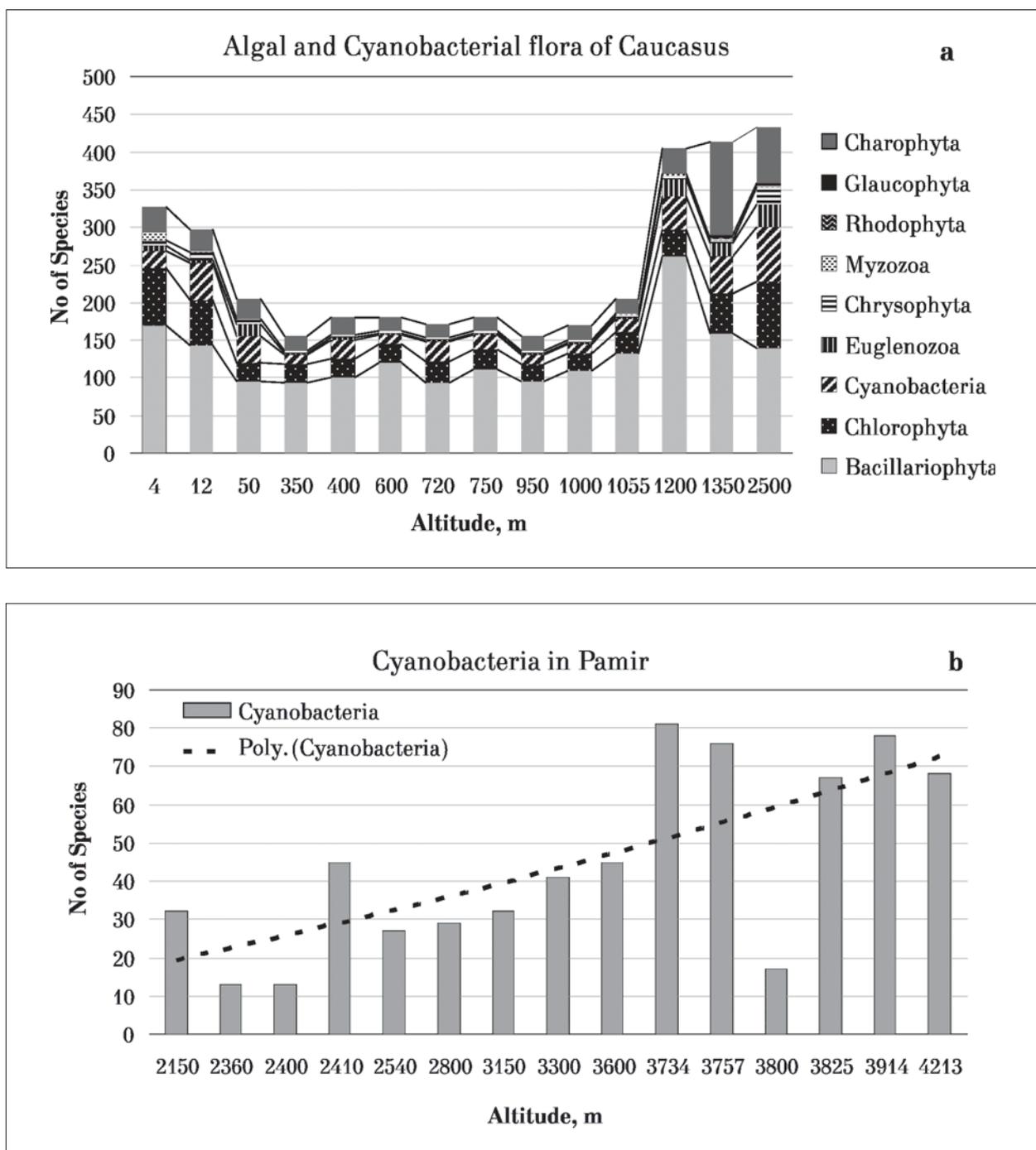


Fig. 3. Taxonomic distribution of algae and cyanobacteria species richness over the Caucasus Mountains (A) and cyanobacteria in Pamir (B) aquatic habitats and increasing the role of cyanobacteria species in high altitude communities. The dotted line is the polynomial trend line of the Cyanobacteria species number distribution over the altitude of its habitat

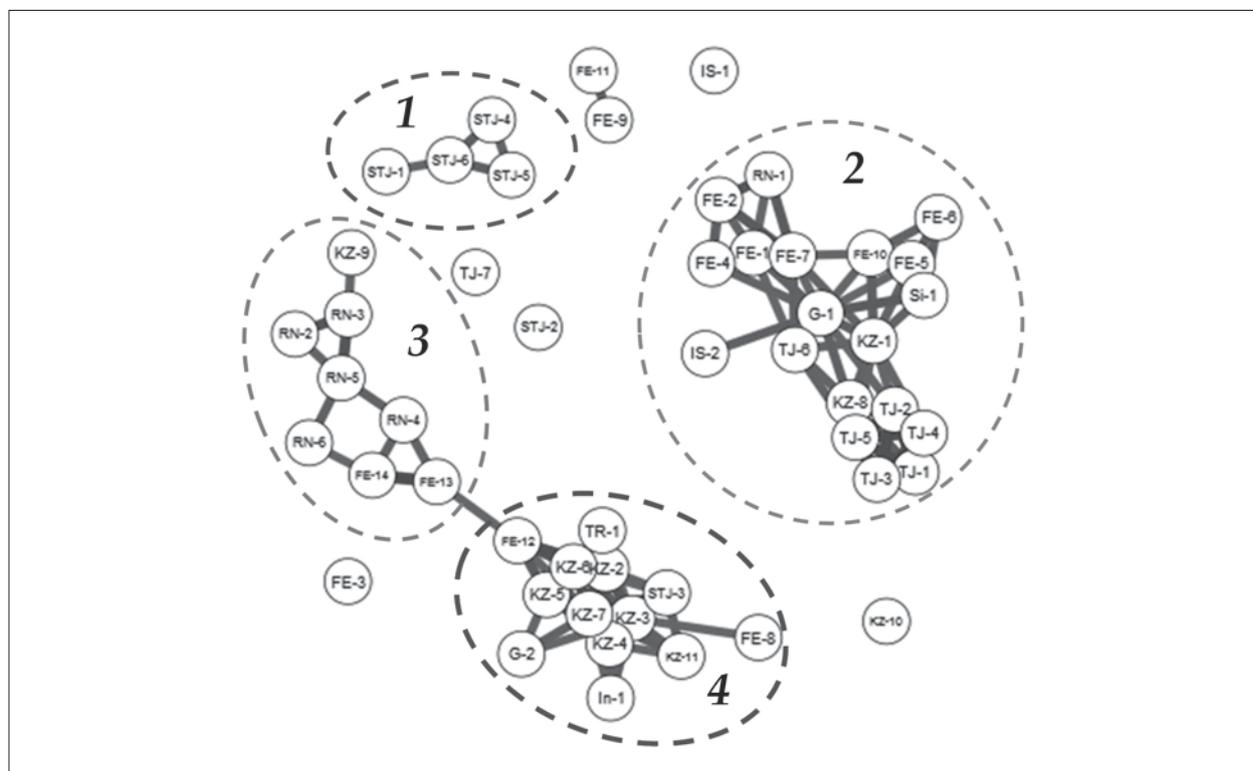


Fig. 4. JASP plot of correlation of the cyanobacteria species richness in 51 algal floras of Eurasia. The dashed colored lines are marked of the clusters with most similar floras. Abbreviations for the Eurasian algae and cyanobacteria floras: STJ, South Tajik Depression; FE, Far East; IS, Israel; KZ, Kazakhstan; TJ, Tajikistan, Pamir; RN, Russian North; G, Georgia; TR, Turkey

Conclusion

Based on our floristic material from 51 algae flora in continental water bodies of Eurasia, the influence of the main environmental factors on the distribution of the diversity of cyanobacteria was revealed. The first group represents local factors that are more related to local conditions and pollution, which are characterized by exposure instability, short duration and wide amplitude. The second group represents climate-related global factors, such as habitat latitude and altitude. Cyanobacteria respond to changes in local factors, such as temperature, associated with the seasonality of the climate, increasing their productivity, but reducing their species richness. A group of global climatic factors, such as a decrease in the average annual temperature at high latitudes, an increase in insolation at high altitudes, is reflected in the confinedness of the diversity of cyanobacteria to the amplitude of these factors in the region. At the same time, they have a stimulating effect on the diversity of cyanobacteria and increase their intraspecific variability. The intraspecific variability index increases its values with increasing latitude and altitude of the habitat of cyanobacteria. Thus, the

Ssp/Sp index can serve as an indicator of climatic stress and, at the same time, as an indicator of the survival of cyanobacteria under conditions of climatic instability and local pollution.

This research was partly supported by The Russian Foundation for Basic Research grant № 19-04-20031 and Israeli Ministry of Aliyah and Integration.

References

1. Barinova S., Gabyshev V., Boboev M., Kukhaleishvili L., Bilous O. Algal indication of climatic gradients // American Journal of Environmental Protection. Special Issue: Applied Ecology: Problems, Innovations. 2015. No. 4 (3-1). P. 72-77. doi: 10.11648/j.ajep.s.2015040301.22
2. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. Diversity of algal indicators in the environmental assessment. Tel Aviv, Israel: Pilies Studio, 2006. 498 p. (in Russian).
3. Barinova S. Algal diversity dynamics, ecological assessment, and monitoring in the river ecosystems of the Eastern Mediterranean. Hauppauge, NY, USA: Nova Science Publishers, 2011. 363 p.
4. Love J., Selker R., Marsman M., Jamil T., Dropmann D., Verhagen A.J., Ly A., Gronau Q.F., Smira M., Epskamp S., Matzke D., Wild A., Roudier J.N., Morey R.D., Wagenmak-

ers E.J. JASP: graphical statistical software for common statistical designs // J. Stat. Softw. 2019. No. 88 (2). P. 1–17. doi: 10.18637/jss.v088.i02

5. Whittaker R.J., Willis K.J., Field R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity // Journal of Biogeography. 2001. No. 28. P. 453–470. doi: 10.1046/j.1365-2699.2001.00563.x

6. Fokina A.I., Lyalina E.I., Trefilova L.V., Ashikhmina T. Ya. The response of soil cyanobacteria *Nostoc paludosum* to the effect of copper (II) sulfate in the presence of the restored glutathione // Theoretical and Applied Ecol-

ogy. 2019. No. 3. P. 101–108. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-101-108 2019

7. Protasov A., Barinova S., Novoselova T., Syliaieva A. The aquatic organisms diversity, community structure, and environmental conditions // Diversity. 2019. No. 11 (10). P. 190. doi: 10.3390/d11100190

8. Tsarenko P.M., Ennan A.A., Shikhaleyeva G.N., Barinova S.S., Gerasimiuk V.P., Ryzhko V.E. Cyanoprokaryota of the Kuyalnik Estuary Ecosystem (Ukraine) // International Journal on Algae. 2016. No. 18 (4). P. 337–352. doi: 10.1615/InterJAlgae.v18.i4.40

Комплексы цианопрокариот и водорослей в зоне влияния магистрального газопровода (бассейн реки Кара)

© 2020. Л. Н. Тикужева, аспирант,

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,

167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар,

ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: ltikusheva@yandex.ru

Инфраструктура транспортировки газа оказывает значительное антропогенное давление на чувствительные экосистемы арктических регионов. Проведена оценка влияния строительства и эксплуатации газопровода «Бованенково-Ухта» на водные экосистемы Полярного Урала и прилегающие территории Большеземельской тундры. Представлены данные о состоянии водных объектов бассейна р. Кара в зоне влияния магистрального газопровода, а также на фоновых участках, не испытывающих прямое влияние промышленного объекта. Для оценки трансформации водных экосистем использованы сведения о химическом составе вод и донных отложений, о видовом разнообразии и доминирующих видах водорослей. В водной среде в зоне влияния газопровода повышено содержание Fe, Cu, Ni и As. В донных отложениях увеличивается концентрация нефтепродуктов, As и тяжёлых металлов (Fe, Hg, Zn, Cu). Отмечен рост уровня сапробности рек и озёр. В водоёмах выявлено 206 видов с внутривидовыми таксонами из 77 родов. Отражены особенности изменения структуры и разнообразия альгоценозов под влиянием загрязняющих веществ. Приведены виды-индикаторы, находящиеся в оптимуме своего развития. Признаком токсического загрязнения водных экосистем объектами газопровода является увеличение доли *r*-стратегов, стимуляция размножения *Scenedesmus communis* с образованием его мелких форм.

Ключевые слова: водные объекты, антропогенное воздействие, химический состав вод, донные отложения, альгоценозы, альгоиндикация.

Cyanoprokaryota and algae complexes in the impact zone of the main gas pipeline (the Kara River basin)

© 2020. L. N. Tikusheva ORCID: 0000-0001-6348-1970

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

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

e-mail: ltikusheva@yandex.ru

The infrastructure of gas transportation has a significant anthropogenic pressure on the sensitive natural ecosystems of the Arctic regions. We estimated the impact of construction and operation of the “Bovanenkovo-Ukhta” gas pipeline (the section of the “Yamal-Europe” pipeline system) on the water ecosystems of the Polar Urals and the adjacent territories of the Bolshezemelskaya tundra. We analyzed the chemical composition of the surface waters and bottom sediments, studied the structure and species diversity of algae for unaffected and impacted lakes and water streams in the Basin of the Kara River. To assess the transformation of aquatic ecosystems, we used information on the chemical composition of water and bottom sediments, and on the dominant species of algae. In the aquatic environment, the content of Fe, Cu, Ni, As is increased in the zone of influence of the gas pipeline. In bottom sediments, the concentration of petroleum products, arsenic, and a number of heavy metals (Fe, Hg, Zn, Cu) increase. It is marked an increase in the level of saprobity of rivers and lakes. In total, 206 species with intraspecific taxa from 77 genera were identified in the studied water bodies. The features of changes in the structure and diversity of algalocenoses under the influence of pollutants are reflected, as well as the importance of cyanoprokaryotes in the composition of dominant algae complexes. Indicator species that are in the optimum of their development are given. An increase in the share of *r*-strategists was revealed, including stimulation of the propagation of *Scenedesmus communis* with the formation of its small forms, which is a sign of toxic pollution of aquatic ecosystems with gas pipeline facilities.

Keywords: water bodies, anthropogenic impact, chemical composition of water, bottom sediments, algalocenoses, algalindication.

Оценить степень трансформации природных ландшафтов под воздействием новых промышленных объектов на ранних стадиях их функционирования помогают наиболее чувствительные живые организмы, к таким относятся водоросли. Альгофлора является индикатором водной среды и отражает характер антропогенной нагрузки [1, 2]. Доминирующая роль в водорослевых группировках всегда будет принадлежать видам, находящимся в оптимуме условий своего развития. Норма реакции, свойственная всем живым системам, проявление адаптивных механизмов в меняющихся условиях среды определяют структуру биоценоза. При этом важно как определение организации альгоценозов, характерной для естественных, не изменённых водных экосистем данного района, так и выявление особенностей таксономической и экологической структуры водорослевых сообществ, проявляющихся при наличии антропогенного воздействия [1, 3]. Для оценки степени экологической трансформации водоёмов большое значение имеет сопоставление диагностических признаков альгофлоры с химическими показателями водной среды.

В настоящее время на территории Большеземельской тундры и Полярного Урала в бассейне р. Кара введён в эксплуатацию магистральный газопровод «Ямал-Центр», в результате водные экосистемы региона трансформируются при строительстве линейных сооружений и находятся под воздействием эмиссий загрязняющих веществ, происходит накопление поллютантов [2–4]. Ореолы пылевых загрязнений от газопровода и обслуживающей его автомобильной дороги, а также выбросы компрессорных станций регистрируются по материалам космической съёмки и распространяются на десятки километров [2]. Актуальность исследования водных объектов в бассейне р. Кара обусловлена тем, что необходимо планомерное изучение происходящих изменений в результате деятельности объектов магистрального газопровода для оценки состояния водных экосистем, организации мониторинга и составления долгосрочных прогнозов трансформации и стабилизации водных экосистем в условиях усиливающегося антропогенного пресса. Одной из наиболее показательных групп, индицирующих трансформацию водной среды, являются водоросли, способные быстро реагировать на изменение химических показателей водоёмов, что широко используется в биоиндикации [5–7].

Цель исследований – анализ изменения видового состава и доминантных комплексов цианопрокариот и водорослей водоёмов бас-

сейна реки Кара, расположенных в зоне воздействия трассы крупного газопровода, оценка на их основе происходящих в водных экосистемах изменений.

Объекты и методы исследования

Исследовано видовое разнообразие цианопрокариот и водорослей (за исключением диатомовых) водных объектов бассейна р. Кара в зоне влияния магистрального газопровода: р. Кара и её притоки – реки Б. Лядгей, Нярма, озёра Б. Манясейто, Коматы, без названия № 1 (68°01' с. ш., 65°11' в. д.), а также водные объекты, не испытывающие влияния строительства и эксплуатации газопровода: р. Силова-Яха, её правый приток первого порядка – р. Хальмерью, озёра Хальмерты, Круглое, Тройное, без названия – № 3 (68°11' с. ш., 64°30' в. д.), № 4 (68°10' с. ш., 64°29' в. д.), № 5 (68°10' с. ш., 64°34' в. д.) – в бассейне р. Силова-Яха, на водосборе которой влияние магистрального газопровода отсутствует, имеются иные источники загрязнения: территория используется для оленеводства, развивается рекреация и туризм. В непосредственной близости от трассы газопровода проходит грунтовая автомобильная дорога с забетонированными мостовыми переходами через реки. Отбор проб воды, донных отложений и водорослей фитопланктона и перифитона проведён в июле–августе 2011–2013 гг. общепринятыми методами [8]. Пробы природной поверхностной воды, донных отложений и водорослей в водотоках отобраны на двух участках для каждой реки, на расстоянии 500 м от дороги на условно чистом и загрязнённом. Химический анализ воды и донных отложений выполнен в аккредитованной лаборатории «Экоаналит» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Для определения видового разнообразия цианопрокариот и водорослей использованы отечественные и зарубежные определители [9–11], с учётом современной номенклатуры [12] и их индикаторных свойств [1].

Статистический анализ по выявлению влияния химических показателей на водорослевые сообщества выполнен с привлечением программы Statistica 6.0 (StatSoft, США), статистической программы R (версия 3.5.1) и Excel надстройки – ExStatR [13].

Результаты и обсуждение

Исследования показали [2, 3], что основные характеристики: pH, цветность, перман-

ганатная и бихроматная окисляемость, содержание N и P находятся преимущественно в пределах природной нормы для водоёмов данного района [14]. При этом отмечено загрязнение вод и донных отложений нефтепродуктами, Zn, Cu, Hg и другими тяжёлыми металлами в результате аэротехногенного воздействия объектов инфраструктуры газопровода и смыва поллютантов с загрязнённой территории [3]. При этом признаки загрязнения водных объектов в зоне влияния магистрального газопровода и автомобильной дороги проявляются при сопоставлении данных химического анализа природной поверхностной воды и донных отложений. Например, содержание Cu в воде обследованных водоёмов отмечено на уровне 0,22–2,10 мкг/дм³, а в донных отложениях р. Нярма концентрация Cu на фоновом участке составила 8,1, в зоне загрязнения – 250 мг/кг, что может свидетельствовать о формировании локальной техногенной геохимической аномалии. Аналогично, экстремально высокие значения отмечены также для Zn в донных отложениях на загрязнённых участках рек: 190 – в р. Б. Лядгей, 1800 мг/кг – в р. Кара (при этом в верхних створах этих рек – соответственно 40 и 34, что сопоставимо со средним значением других проб – 31,6 мг/кг), при массовом содержании Zn во всех пробах воды менее 2,5 мкг/дм³. В отношении других выше указанных поллютантов загрязнение так же проявляется в их накоплении в донных отложениях. Легкорастворимые органические вещества содержатся в воде в небольшом количестве, что отражается в показателях цветности (70–53°), перманганатной окисляемости (1,27–7,8 мг/дм³) и соответствует данным других исследователей [14]. По данным [14], цветность на уровне 7–28° свидетельствует о наличии органического вещества преимущественно автохтонного происхождения. В настоящем исследовании цветность воды большинства водных объектов отмечена на уровне 7–19°. Исключение составили озёра Коматы и № 1 (37 и 34° соответственно), загрязнённые в результате эксплуатации газопровода, а также озёра, испытывающие воздействие традиционного природопользования и получающие питание с заболоченной территории – № 3, № 4, Тройное (31, 37, 53° соответственно). Наибольшие значения содержания N характерны для оз. Тройное ($N_{\text{общ}} - 1,61 \text{ мг/дм}^3$, $\text{NH}_4^+ - 1,04 \text{ мг/дм}^3$ (что выше ПДК_{рыбохоз} = 0,5 мг/дм³), $\text{NO}_3^- - 0,82 \text{ мг/дм}^3$ (менее ПДК_{рыбохоз} = 40,0 мг/дм³)): возможно, это озеро в большей степени испытывает нагрузку от

оленоводства. В других исследованных водных объектах аналогичные показатели изменяются в следующих пределах: $N_{\text{общ}} - 0,073-0,880 \text{ мг/дм}^3$, $\text{NH}_4^+ - 0,018-0,44 \text{ мг/дм}^3$, $\text{NO}_3^- - 0,005-0,044 \text{ мг/дм}^3$. Увеличение концентрации N является интегральным показателем антропогенной эвтрофикации водоёмов [1, 5]. Наряду с появлением токсичных свойств среды обитания, как правило, увеличивается содержание биогенных элементов. Высокая доля их биодоступных форм в экосистеме свидетельствует о том, что полностью они не утилизируются в трофической системе, создавая условия для интенсивного развития устойчивых форм первичных продуцентов [6, 15]. Дополнительно для вод Полярного Урала были определены показатели неорганического (IC) и органического углерода (DOC). Нижнее значение IC – в оз. Б. Манясейто (3,2–3,6), верхнее – в оз. № 1 (9,1), в остальных – 5,8–7,9 мг/дм³, DOC наименьшее в водотоках (реки Нярма, Б. Лядгей, Кара) – 0,80–1,21, максимальное – в испытывающих влияние газопровода оз. Коматы и оз. № 1 – 6,7 и 6,1 мг/дм³, соответственно, что кроме различий в гидрологическом режиме подтверждает ранее отмеченную закономерность.

Наиболее загрязнёнными из обследованных водных объектов по всем показателям являются озёра Коматы и № 1. Кроме выше указанного, выявлено высокое содержание нефтепродуктов: в оз. № 1 – 0,014, оз. Коматы – 0,011 мг/дм³ (в остальных – менее 0,0050 мг/дм³). Для озёр № 1 и Коматы отмечены максимальные значения Fe в воде: 0,17 и 0,057 мг/дм³, соответственно (в первом достигает значения 1,7 ПДК_{рыбохоз}), при фоновом значении 0,002–0,028 мг/дм³ (для других обследованных водных объектов), что может быть признаком антропогенного загрязнения Fe от объектов магистрального газопровода. Для оз. Коматы диагностировано наличие свежего поступления Hg (< 0,010 в воде, при этом в донных отложениях содержится 6 мкг/кг). По всем показателям наиболее чистое – оз. Б. Манясейто, расположенное на расстоянии 8 км от магистрального газопровода и грунтовой автомобильной дороги, закрытое от них горным массивом, препятствующим техногенному пылевому загрязнению. Таким образом, в зоне воздействия происходит повышение уровня сапробности рек и озёр (значимое увеличение интегральных показателей содержания органических веществ – цветности, $N_{\text{общ}}$, DOC, $p < 0,05$), а при накоплении поллютантов (Fe, Hg, Zn, Cu, As) – уровня токсичности среды обитания.

Водоросли чувствительны к антропогенным изменениям, наблюдается перестройка таксономической и экологической структуры альгоценозов, выпадение экологически специализированных видов. В обследованных водных объектах в бассейне р. Кара выявлено 206 видов с внутривидовыми таксонами из 77 родов, 46 семейств, 7 отделов. Основу альгоценозов формируют экологически лабильные виды, характерные для водных объектов Полярного Урала и Большеземельской тундры. 12 ведущих по видовому богатству родов объединяют 108 (52%) выявленных видов. В водорослевых сообществах по числу видов (без учёта диатомовых, сведения о них составе опубликованы ранее [2, 3]) преобладают представители родов *Cosmarium*, *Scenedesmus*, *Staurastrum*, *Closterium*. Обследованные реки и озёра проявляют широкий спектр различных условий для развития водорослей, соответственно в значительной степени варьируют видовой состав их альгоценозов и доминантные комплексы видов. Во всех пробах наблюдали доминирование диатомовых водорослей, приспособленных к обитанию в холодных, низкоминерализованных и бедных биогенами водах [2, 3]. При этом также были распространены виды-обитатели северных районов из десмидиевых, зелёных и цианопрокариот. В условиях воздействия объектов газопровода на импактных участках в целом сокращается видовое разнообразие (в бас. р. Силова-Яха – 138, в бас. р. Кара – 130 видов), при этом уменьшается доля Цианопрокариота и Chlorophyta, исчезают Rhodophyta, лидирующую роль по числу видов занимают представители отдела Streptophyta. По результатам статистического анализа выявлена связь между показателями загрязнения и структурой альгоценозов (рис. 1, см. цв. вкладку). Наибольшая степень корреляции по коэффициенту Пирсона (K_{np}) отмечена для рН – в отношении большинства групп водорослей она отрицательная (K_{np} от -0,48 до -0,55, $p < 0,05$), за исключением Euglenophyta, которые положительно реагируют на антропогенное подщелачивание вод ($K_{np} = 0,36$). С показателем цветности наблюдается отрицательная корреляция для Rhodophyta ($K_{np} = -0,35$), которые наиболее требовательны к прозрачности вод и обитают в основном в чистых быстро текущих реках. Многие представители Dinophyta являются индикаторами чистоты вод, что проявляется в виде отрицательной корреляции ($K_{np} = -0,21$) с показателем цветности. Для остальных групп водорослей отмечена слабая положительная

связь с цветностью воды (рис. 1). На содержание биогенных элементов Zn ($K_{np} = 0,52$, $p < 0,05$) и K ($K_{np} = 0,29$) выявлена положительная корреляция для подавляющего большинства водорослей, небольшая отрицательная – для представителей Euglenophyta ($K_{np} = -0,2$). Для этого отдела отмечена положительная связь с показателями цветности, ХПК, содержанием фосфат-ионов (на последние Euglenophyta, единственные из всех водорослей, проявляют положительную корреляцию). В отношении тяжёлых металлов Pb и Co большинство таксономических групп водорослей демонстрируют отрицательные значения коэффициента Пирсона (рис. 1). Ochrophyta в основном нейтрально относится к условиям среды. Из исследованных групп водорослей сходное отношение к экологическим факторам проявляют Цианопрокариота, Chlorophyta и Streptophyta, которые формируют основу альгофлоры района Большеземельской тундры и Полярного Урала такое соотношение условий среды для них является оптимальным.

Кроме изменения таксономической структуры в альгоценозах наблюдается и перестройка в доминантных комплексах: чаще других их основу формируют представители родов *Dolichospermum*, *Cosmarium*, *Anabaena*, *Tetraspora*, *Nostoc*, *Dinobryon* характерные для летнего фитопланктона всех обследованных водоёмов.

Dolichospermum lemmermannii и *D. flosoaquae* (Bréb.) P. Wacklin, L. Hoff. & J. Komárek доминировали в зоне «цветения» озёр Тройное, Круглое, № 3 и № 4. Ранее также отмечалось «цветение» воды, вызванное массовым развитием этих видов [16].

Диагностическим признаком токсического воздействия загрязнения от объектов магистрального газопровода является появление в составе доминантов *r*-стратегов: *Scenedesmus communis* с образованием его мелкоклеточных форм (отмечено значимое уменьшение размеров до 2 мкм при $p < 0,05$) в импактной зоне р. Б. Лядгей и оз. № 1. Сравнительный анализ водорослевых комплексов в водоёмах, подверженных воздействию газопровода, с фоновыми озёрами [3], проведённый для термокарстового оз. № 1 и крупного оз. Коматы, которые испытывают наибольшее воздействие от объектов магистрального газопровода [2, 3], показал выпадение из комплекса доминантов экологически специализированных видов из отдела Streptophyta, представителей родов *Closterium*, *Cosmarium*, *Staurastrum*.

Из индикаторов качества среды с высокой встречаемостью отмечены алкалин-

фи́лы *Audouinella chalybaea* (Roth) Bory и *Chantransia* sp. (доминируют в импактной зоне рек). Эти виды при массовом развитии могут свидетельствовать об антропогенном подщелачивании водных объектов относительно ненарушенных природных аналогов, что отмечено и для других северных регионов [7]. Среди ацидофилов отмечены *Aphanocapsa grevillei* (Berkeley) Rabenh. в оз. Коматы, испытывающем значительное антропогенное загрязнение от компрессорной станции газопровода, и *Closterium tumidulum* F. Gay, который не достигает массового развития, но является видом с высокой встречаемостью в загрязнённых водных объектах. Индикатором значительного и постоянного воздействия объектов инфраструктуры (бытовые стоки компрессорных станций) является развитие в водорослевых сообществах оз. Коматы видов из отдела Euglenophyta, не характерных для чистых водоёмов Большеземельской тундры и Полярного Урала [3]. В импактной зоне объектов газопровода также часто встречаются *Cosmarium botrytis* Meneg. ex Ralfs, *C. formosulum* Hoff, *Euastrum bidentatum* Näg., *Closterium ehrenbergii* Meneg. ex Ralfs – типичные представители реофильного комплекса, обитающие в затронутых деятельностью человека водоёмах. Олигосапроб *Staurastrum muticum* (Bréb.) ex Ralfs, его массовое развитие, напротив, свидетельствует о чистых условиях водной среды. Олигогалофоб *Cosmarium reniforme* (Ralfs) W. Archer является доминантом по численности в оз. Б. Манясейто, что является показателем чистоты его вод. Считаем, что узкоспециализированные виды проявляют себя как диагностический признак определённых условий при их нахождении в зоне оптимума и массовом развитии.

В импактной зоне рек отмечено изменение соотношения индикаторов уровня сапробности (рис. 2, см. цв. вкладку), на загрязнённых участках при сохранении ведущей роли β -мезосапробов увеличивается участие α -мезосапробов, уменьшается – (χ - α , α - χ , χ - β)-сапробов, при этом исчезают виды – (α - β , β - α)-мезосапробы.

Заключение

Водные объекты в зоне влияния магистрального газопровода в основном сохраняют свои природные особенности, при этом проявляется техногенное загрязнение вод и донных отложений нефтепродуктами, ртутью, цинком, медью и другими тяжёлыми металлами.

В обследованных водных объектах в бассейне р. Кара вдоль магистрального газопровода «Бованенково-Ухта» выявлено 206 видов с внутривидовыми таксонами из 77 родов. Основу альгоценозов формируют экологически лабильные виды, характерные для водных объектов Полярного Урала и Большеземельской тундры. В результате аэротехногенного загрязнения объектов магистрального газопровода наблюдается изменение таксономической и экологической структуры альгоценозов, выпадение экологически специализированных видов, повышение уровня сапробности рек и озёр. Наиболее загрязнёнными из обследованных водных объектов являются озёра Коматы и № 1. Проявлениями критической нагрузки на водные экосистемы и снижения качества вод являются увеличение доли r -стратегов, формирование маловидовых сообществ водорослей с ярко выраженным доминированием нескольких видов, исчезновение из альгоценозов чувствительных таксонов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ЕГИСУ НИОКР: АААА-А19-119011790022-1). Статья опубликована при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

Литература

1. Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Университет Хайфы, 2006. 498 с.
2. Патова Е.Н., Стенина А.С., Тикушева Л.Н., Лоскутова О.А., Сивков М.Д. Комплексная оценка водных экосистем бассейна реки Кары, трансформированных в результате транспортировки углеводородов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 2. С. 30–50.
3. Тикушева Л.Н., Стенина А.С., Патова Е.Н. Изменение водных экосистем под влиянием строительства и эксплуатации газопровода «Бованенково-Ухта» (бассейн реки Кара, Полярный Урал и Большеземельская тундра) // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2015. № 2 (22). С. 25–30.
4. Башкин В.Н., Казак А.С., Сафонов В.С. Оценка экологического риска в зоне воздействия магистрального газопровода Ямал-Центр // Охрана окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 3. С. 9–14.
5. Xu F.L., Tao S., Dawson R.W., Li P.G., Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods // Water Research. 2001. V. 4. No. 35 (13). P. 3157–3167.
6. Reavie E.D., Jicha T.M., Angradi T.R., Bolgrien D.W., Hill B.H. Algal assemblages for large river monitoring: comparison among biovolume, absolute and relative abun-

dance metrics // *Ecological Indicators*. 2010. V. 10. No. 2. P. 167–177.

7. Schneider S., Lindstrøm E.A. Bioindication in Norwegian rivers using non-diatomaceous benthic algae: the acidification index periphyton (AIP) // *Ecological indicators*. 2009. V. 9. No. 6. P. 1206–1211.

8. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: Справочные материалы. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

9. Komárek J. Süßwasserflora von Mitteleuropa // *Cyanoprokaryota III: Nostocales, Stigonematales*. Bd. 19/3. Springer Spektrum, Berlin, 2013. 1130 p.

10. Komárek J., Fott B. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Chlorococcales // *Das Phytoplankton des Süßwassers 7* / Ed. G. Huber-Pestalozzi. Bd. XVI. Teil. 1. Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1983. 1044 p.

11. Coesel P.F.M., Meesters K. Desmids of the Lowlands. Mesotaeniaceae and desmidiaceae of the European Lowlands. Zeist: KNNV Publishing, 2007. 351 p.

12. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Internet resource] <http://www.algaebase.org> (Accessed: 31.01.2020).

13. Новаковский А.Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // *Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН*. 2016. № 3. С. 26–33.

14. Хохлова Л.Г. Гидрохимическая изученность поверхностных вод Большеземельской тундры // *Возобновимые ресурсы водоёмов Большеземельской тундры*. Труды Коми научного центра УрО РАН. 2002. № 169. С. 5–14.

15. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.

16. Патова Е.Н. Цианопрокарриотическое «цветение» водоёмов восточно-европейских тундр (флористические и функциональные аспекты) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2007. № 3. С. 4–10.

References

1. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. Biodiversity of algae-indicators of the environment. Tel Aviv: Haifa University, 2006. 498 p. (in Russian).

2. Patova E.N., Stenina A.S., Tikusheva L.N., Loskutova O.A., Sivkov M.D. Complex assessment of water ecosystems of the Kara river basin transformed as a result of hydrocarbon transportation // *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 2018. V. 29. No. 2. P. 30–50 (in Russian). doi: 10.21513/0207-2564-2018-2-30-50

3. Tikusheva L.N., Stenina A.S., Patova E.N. Changes in aquatic ecosystems under the influence of construction and operation of the Bovanenkovo-Ukhta gas pipeline (Kara river basin, Polar Urals and Bolshezemelskaya

tundra) // *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2015. No. 2 (22). P. 25–30 (in Russian).

4. Bashkin V.N., Kazak A.S., Safonov V.S. Environmental risk assessment in the impact zone of the Yamal-Center gas pipeline // *Okhrana okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. 2006. No. 3. P. 9–14 (in Russian).

5. Xu F.L., Tao S., Dawson R.W., Li P.G., Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods // *Water Research*. 2001. V. 4. No. 35 (13). P. 3157–3167. doi: 10.1016/S0043-1354(01)00040-9

6. Reavie E.D., Jicha T.M., Angradi T.R., Bolgrien D.W., Hill B.H. Algal assemblages for large river monitoring: comparison among biovolume, absolute and relative abundance metrics // *Ecological Indicators*. 2010. V. 10. No. 2. P. 167–177. doi: 10.1016/j.ecolind.2009.04.009

7. Schneider S., Lindstrøm E.A. Bioindication in Norwegian rivers using non-diatomaceous benthic algae: the acidification index periphyton (AIP) // *Ecological indicators*. 2009. V. 9. No. 6. P. 1206–1211. doi: 10.1016/j.ecolind.2009.02.008

8. Hydrochemical indicators of the state of the environment: Reference materials. Moskva: VNIRO, 1999. 304 p. (in Russian).

9. Komárek J. Süßwasserflora von Mitteleuropa // *Cyanoprokaryota III: Nostocales, Stigonematales*. Bd. 19/3. Springer Spektrum, Berlin, 2013. 1130 p.

10. Komárek J., Fott B. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Chlorococcales // *Das Phytoplankton des Süßwassers 7* / Ed. G. Huber-Pestalozzi. Bd. XVI. Teil. 1. Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1983. 1044 p. (in Deutsch).

11. Coesel P.F.M., Meesters K. Desmids of the Lowlands. Mesotaeniaceae and desmidiaceae of the European Lowlands. Zeist: KNNV Publishing, 2007. 351 p.

12. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Internet resource] <http://www.algaebase.org> (Accessed: 31.01.2020).

13. Novakovskiy A.B. The interaction of Excel and statistical package R for data processing in ecology // *Vestnik Instituta biologii Komi NC UrO RAN*. 2016. No. 3. P. 26–33 (in Russian). doi: 10.31140/j.vestnikib.2016.3(197)

14. Khokhlova L.G. Hydrochemical study of surface waters of the Bolshezemelskaya tundra // *Vozobnovimye resursy vodoemov Bolshezemelskoy tundry*. Trudy Komi nauchnogo tsentra UrO RAN. 2002. No. 169. P. 5–14 (in Russian).

15. Moiseenko T.I. Water ecotoxicology: theoretical and applied aspects. Moskva: Nauka, 2009. 400 p. (in Russian).

16. Patova E.N. Cyanoprokaryotic “flowering” of water bodies of the East European tundra (floristic and functional aspects) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2007. No. 3. P. 4–10 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-004-010

Геоэкологические исследования снега и поверхностных вод в зимний период в центральной части Кольского полуострова

© 2020. Е. Л. Воробьевская, к. г. н., с. н. с., Н. Б. Седова, к. г. н., с. н. с., М. В. Слипенчук, д. э. н., профессор, М. Н. Цымбал, с. н. с., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, e-mail: nsedova@mail.ru

Окружающая среда центральной части Кольского полуострова на протяжении многих десятилетий испытывает влияние крупных промышленных комплексов: предприятий по добыче и переработке апатито-нефелиновой руды, медно-никелевого металлургического комбината и других производств, которые обуславливают высокую нагрузку на экосистемы, что приводит к деградации ландшафтов. Для выявления состояния геоэкологической обстановки в центральной части Мурманской области проведены исследования снежного покрова и воды. Проведённый гидрохимический анализ проб снега и воды, отобранных на ключевых участках, показал, что в настоящее время в районе исследования наблюдается значительное загрязнение природной среды тяжёлыми металлами, особенно в районе Мончегорска. Также прослеживается площадное загрязнение аэротехногенными поллютантами на расстоянии на 80 и более км на северо-запад от источника загрязнения (комбината «Североникель»). Другим районом с неблагоприятной геоэкологической обстановкой, согласно проведённым исследованиям, является Кировско-Апатитский в зоне влияния горнодобывающего и горно-обогачительного производства.

Ключевые слова: геоэкологические исследования, Кольский полуостров, загрязняющие вещества, геоэкологическая ситуация, мониторинг окружающей среды.

Environmental situation in the central part of the Kola Peninsula

© 2020. E. L. Vorobyevskaya ORCID: 0000-0003-2077-5594
 N. B. Sedova ORCID: 0000-0003-3600-4444
 M. V. Slipenchuk ORCID: 0000-0003-0308-250X
 M. N. Cymbal ORCID: 0000-0002-4698-0249
 Lomonosov Moscow State University,
 1, Leninskiye Gory St., Moscow, Russia, 119991,
 e-mail: nsedova@mail.ru

The environment of the central part of the Kola Peninsula has been influenced by large industrial complexes for many decades. The analysis of the nature of anthropogenic impacts and responses of nature to them is an important component of environmental protection, which is necessary for optimization of economic activities in the region. In this regard, the aim of our research was to monitor the geoecological situation in the central part of the Kola Peninsula and identify the key zones of pollution, as well as the main pollutants.

The carried out research revealed zones of considerable pollution especially in the area of Monchegorsk where the copper-nickel metallurgic plant is situated. However, compared to the 30, 20, and 10-year-old testing results, it can be noted that there is a significantly lower impact of pollution as a result of the plant's activities, which is due to its modernization. In the area affected by the mining and chemical industry in the vicinity of the towns of Kirovsk and Apatity, contamination with aerotechnogenic pollutants can be traced.

There is also an area contaminated with aerotechnogenic pollutants spread for further distances from the source of the pollution. At the same time the investigated plots are influenced not only by local industry, but also by anthropogenic sources located in other areas. As a result, there is a total impact of a whole group of different pollutants on ecosystems, which can be synergetic.

Some areas currently do not experience a strong anthropogenic load and can act as background for subsequent environmental monitoring studies.

Keywords: geoecological research, Kola Peninsula, pollutants, environmental situation, monitoring.

Мурманская область – промышленно развитый регион нашей страны. Центральная часть Кольского полуострова является одним из наиболее освоенных районов Российского Заполярья, интенсивное промышленное развитие которого началось в конце 1920-х годов и которое связано с открытием и разработкой крупных месторождений полезных ископаемых: железных, медно-никелевых, лопаритовых, апатито-нефелиновых руд, слюды, керамического сырья, облицовочного камня и т. д. [1, 2]. На базе месторождений и на привозном сырье действуют крупные промышленные комплексы, относящиеся к таким объединениям, как: АО «Апатит», Кольская ГМК, ООО «Ловозёрский ГОК» и другие.

Большое количество промышленных объектов обуславливает высокую нагрузку на экосистемы, что приводит к деградации ландшафтов. Населённые пункты и их окрестности находятся под влиянием деятельности промышленных предприятий. Загрязняющие вещества (ЗВ), поступающие в природную среду со шлаками, с выбросами аэрозольных частиц, с пылением хвостохранилищ, со сточными водами, не проходящими достаточной очистки, – представляют опасность для здоровья людей. За период индустриального освоения природа центральной части Кольского полуострова претерпела антропогенные изменения, многие из которых имеют негативные, иногда, и необратимые последствия. Происходят ответные реакции на антропогенную деятельность разной степени интенсивности, причём последствия могут быть весьма отдалённые [3].

Тем не менее, значительная часть природных ландшафтов до сих пор сохранила свой потенциал для развития таких видов природопользования, как природоохранное, рекреационное, традиционное, которые в настоящее время получают активное развитие. Богатейший природный потенциал Русского Севера, относительно развитая инфраструктура, возможность занятия различными видами рекреационной деятельности на компактной территории с каждым годом привлекают сюда всё большее число туристов. В подтверждение этому в феврале 2018 г. в Хибинских горах был создан национальный парк «Хибины» для охраны уникального природного и историко-культурного наследия, а также организации здесь туристической деятельности [4, 5].

Таким образом, целью исследования стало выявление состояния геоэкологической обстановки в центральной части Мурманской

области, основных зон загрязнения и основных поллютантов с использованием в качестве индикаторов снежного покрова и воды.

Объекты и методы исследований

Исследуемая территория охватывает Хибинский горный массив и части его предгорий, города Кировск, Апатиты, Мончегорск с подведомственными территориями. Исследования проводили на двух участках: «Хибинском» (г. Кировск, г. Апатиты) и «Мончегорском» (г. Мончегорск).

Участок «Хибинский». Группа хибинских месторождений апатито-нефелиновых руд входит в число самых крупных и богатых месторождений мира и является основной базой фосфорсодержащего сырья в России [6]. В районе исследований расположены крупные горнодобывающие и перерабатывающие предприятия, относящиеся к АО «Апатит»: карьеры, обогатительные фабрики, хвостохранилища и т. д.

Город Кировск располагается в горной котловине с застойными, менее благоприятными условиями естественного очищения атмосферы от загрязнения. По данным Кольского научного центра [7], основными загрязнителями атмосферы в результате деятельности АО «Апатит» являются: пылевые частицы, содержащие стронций, цинк, свинец, фосфор, соли алюминия, магний, натрий, кальций, калий, оксиды углерода и азота; для водоёмов – молибден, свинец, фосфор, азот, никель, медь, свинец, сульфаты. Несмотря на то, что на предприятии обеспечена самая высокая в области степень очистки газообразных выбросов, атмосферный воздух и в окрестностях промышленных объектов и в населённых пунктах, загрязнён пылью, содержащей токсические соединения почти на протяжении всего года [8]. На настоящий момент загрязнение воздушной среды г. Кировска в результате деятельности АО «Апатит» в основном связано с подземными и наземными взрывами для добычи руды. Город почти не подвержен влиянию пыления хвостохранилищ и выбросов апатито-нефелиновых обогатительных фабрик (АНОФ), так как расположен на удалении десятков километров от них и защищён склонами Хибин. В зону загрязнения попадают г. Апатиты, посёлок Титан и дачные товарищества, расположенные в южных предгорьях Хибин.

Последствия загрязнения природной среды непосредственно проявляются в угнетении

растительного покрова в окрестностях обогащенных фабрик, изменении механического состава почв вследствие обогащения песчаной фракцией, эвтрофикации озёр, формировании разрушительных селевых потоков, сходящих со склонов отвалов карьеров, нарушение эстетики ландшафтов и т. п. Опосредованно они проявляются в неблагоприятном влиянии на здоровье населения: формирование «проф-патологий» – развитие болезней костной системы вследствие загрязнения стронцием, бронхо-лёгочных и аллергических заболеваний вследствие загрязнения атмосферы и т. п. [7, 9].

Участок «Мончегорский». Горно-металлургическое предприятие полного цикла «Североникель», расположенное в 2 км на юг от г. Мончегорска, входит в состав ОАО «Кольская ГМК» и представляет собой производство по переработке сульфидных медно-никелевых руд и цветных металлов.

Промплощадка комбината расположена в озёрной котловине, с запада, востока и юга окружена невысокими хребтами (тунтури). В процессе работы комбината в природную среду поступают оксиды серы, тяжёлые металлы (ТМ), пылевые частицы, оксиды азота, углерода и др. [10]. Основными характерными ЗВ являются: оксид и диоксид азота, медь, никель, кобальт, оксиды серы и углерода, формальдегид [9]. Деятельность предприятия привела к существенной трансформации природной среды. Лесные массивы северной тайги, прилегающие к производственным территориям, полностью деградировали, на их месте располагается антропогенная пустошь. В настоящее время, когда утилизация сернистого газа по плану достигает 80%, наблюдается начало естественного восстановления экосистем. Деятельность предприятия отрицательно сказывается на «экологии человека», приводя к проявлению профзаболеваний, таких, как хронический бронхит, пневмоклероз, бронхиальная астма, дерматиты, болезни органов кровообращения и опорно-двигательного аппарата [8].

Местоположение района исследований за полярным кругом определяет высокую уязвимость ландшафтов к антропогенному влиянию, низкую способность к самовосстановлению. Кольский полуостров расположен в Атлантико-Арктической зоне умеренного климата [9]. Некоторые особенности атмосферной циркуляции позволяют выделить здесь зоны, различающиеся по потенциалу загрязнения атмосферы (ПЗА): район на-

шего исследования относится к зоне с высоко опасным ПЗА [10]. Для него характерен слабый воздушный перенос по большинству направлений и умеренный в направлении юго-запад – северо-восток. Существенное влияние на перераспределение ЗВ в атмосфере оказывает рельеф. Основные предприятия, являющиеся источниками поступления ЗВ в природную среду, расположены в окрестностях горных массивов, в предгорьях. В зависимости от местных особенностей рельефа и циркуляции атмосферы ЗВ по-разному распределяются в ландшафтах. Горные массивы могут быть преградой на пути распространения ЗВ, и, наоборот, служить местами их накопления. Так, максимум загрязнений с атмосферными осадками получают автономные ландшафты привершинных холмов, склонов гор и их наветренные части.

Наблюдения за состоянием природной среды в центральной части Кольского полуострова ведутся сотрудниками и студентами кафедры рационального природопользования географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ) во время экспедиций и студенческих практик уже на протяжении нескольких десятков лет. Выбор участков мониторинга связан с их географическим положением, характером переноса и особенностями аккумуляции антропогенных загрязнителей [11]. Перед проведением геоэкологических исследований ежегодно проводится анализ изменений состояния природопользования на различных участках, с учётом которых осуществляется корректировка мест отбора проб. В летнее время отбираются пробы воды, почвенного и растительного покровов, зимой проводится отбор проб снежного покрова и воды. Помимо отбора проб визуально оценивается степень антропогенного воздействия и ответная реакция со стороны ландшафтов. Проводится комплексное описание участков мониторинга, в том числе: координаты, положение участка в рельефе, даётся характеристика почвы, фитоценоза, хозяйственной деятельности, оценивается степень деградации ландшафта и его отдельных элементов, фиксируются особенности отображения участка на космическом снимке и пр. [5, 12]. Для выявления площадного загрязнения проводилась профильная съёмка вдоль автомагистрали Мурманск–Санкт-Петербург от промплощадки комбината на 40 км в направлениях на юг и на север. Субмеридиональная вытянутость съёмки обусловлена характером пере-

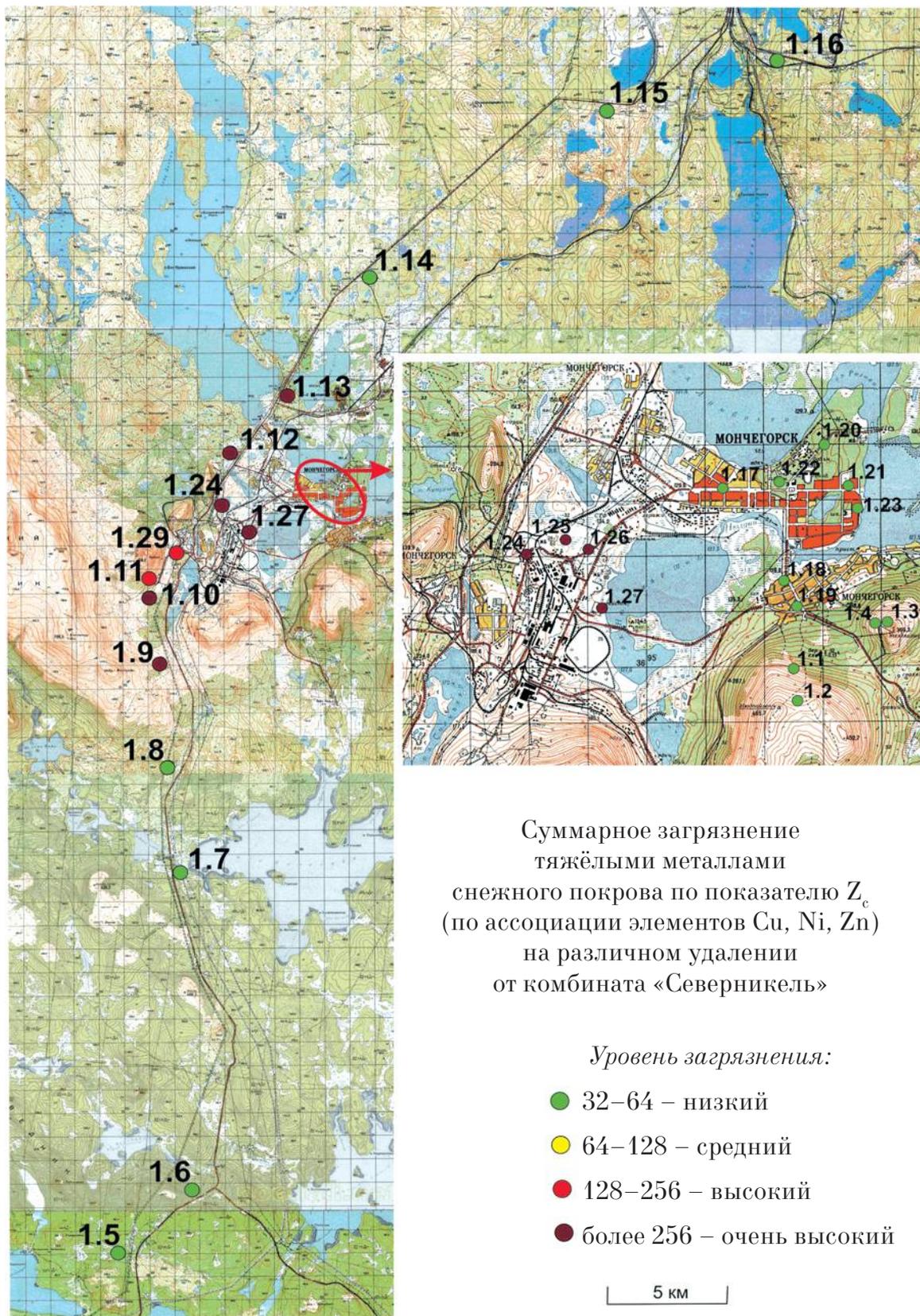
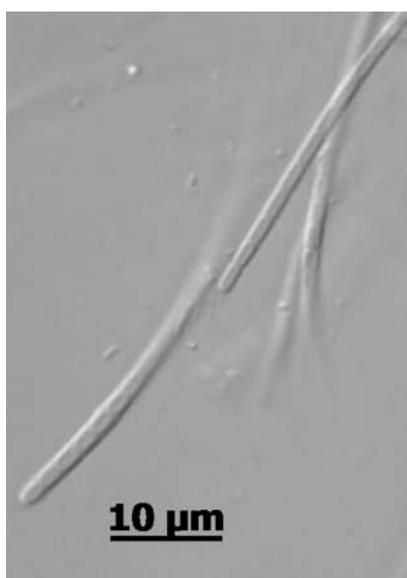


Рис. 1. Суммарное загрязнение тяжёлыми металлами снежного покрова в городе Мончегорске и в зоне влияния комбината «Североникель»
Fig. 1. Total contamination with heavy metals of the snow cover in the city of Monchegorsk and in the zone of influence of the “Severonickel”



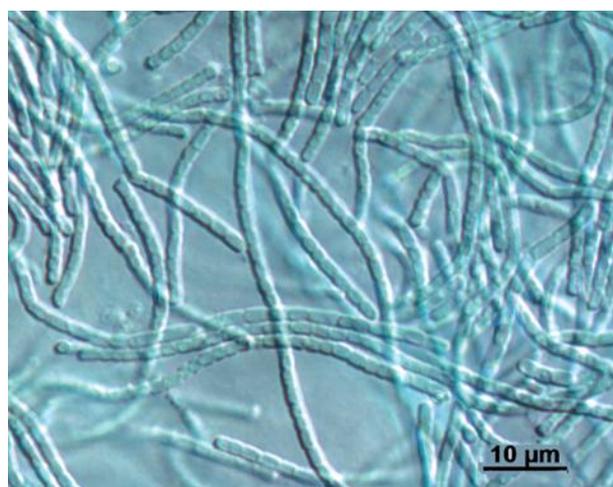
a



b



c



d



e

Рис. 1. Микрофотографии исследованных штаммов цианопрокариот:
a – *Nodosilinea* (штамм КРАВГ-3220) (1 – нодулы), b – *Stenomitos* (КРАВГ-3983),
c – *Drouetiella* (SYKOA-C-002-10), d – *Stenomitos* (SYKOA-C-015-09), e – *Stenomitos* (SYKOA-C-003-10)
Fig. 1. Microphotographs of the cyanoprokaryotes tested strains: a – *Nodosilinea* (KRAVG-3220 strain)
(1 – nodules), b – *Stenomitos* (KRAVG-3983), c – *Drouetiella* (SYKOA-C-002-10), d – *Stenomitos*
(SYKOA-C-015-09), e – *Stenomitos* (SYKOA-C-003-10)

носа антропогенных загрязнителей в соответствии с направлением преобладающих ветров.

Анализы отобранных проб проводили в лаборатории мониторинга водных систем кафедры рационального природопользования и в лаборатории атомной абсорбции кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ.

Результаты и обсуждение

Участок «Хибинский». По результатам проведённых исследований в зоне воздействия горно-промышленного комплекса прослеживается площадное загрязнение аэротехногенными поллютантами, в том числе населённых пунктов: городов Кировск, Апатиты, посёлка Титан и их окрестностей. Естественными барьерами на пути их распределения являются горные массивы Хибин. Отмечено превышение фоновых значений по стронцию (типичному загрязнителю апатито-нефелиновой промышленности) более чем в 4 раза, по меди – в 2 раза, по фосфатам – в 10 раз, по сульфатам и фторидам – в 3 раза.

На основании полученных данных рассчитан суммарный показатель загрязнения (Z_c) ТМ снежного покрова. В районе городов Кировск и Апатиты значения суммарного показателя загрязнения (Z_c) (для ассоциации элементов Cu, Ni, Sr) имеют невысокие значения (32–64) (рис., см. цв. вкладку). Однако следует отметить, что такой результат характерен для зимнего времени, когда хвостохранилище – основной источник пыления – находится под снегом. Летние исследования показали, что г. Апатиты, построенный в предгорьях Хибин и не защищённый от промплощадок горами, испытывает прямое влияние аэротехногенного переноса ЗВ от выбросов АНОФ-2 и пылящего хвостохранилища, расположенного в долине р. Белая. Загрязнение распространяется на часть озера Имандра, вплотную примыкающего к хвостохранилищу, на садово-дачные товарищества, расположенные в южных и юго-западных предгорьях Хибин. Воздействие хвостохранилища в долине р. Жемчужная и АНОФ-3 в настоящее время прослеживается на окрестности посёлка Титан и на южных склонах Хибин. К внешним источникам загрязнения данного участка относится воздействие комбината «Североникель», аэротехногенные поллютанты которого разносятся на значительные расстояния вокруг [7, 9]. В настоящее время загрязнение соединениями меди и цинка («Мончегорский след»)

в данном районе незначительно по сравнению с данными 1980-х гг. – превышение в среднем не более чем в 2 раза, что связано с установкой очистных сооружений на комбинате Североникель и использованием более «чистых» руд Печенгских месторождений вместо Талнахских [13, 14].

Исследования показывают, что вредное воздействие промышленного комплекса испытывают и водные экосистемы: в Хибинах и их предгорьях – это озёра Имандра, Умбозеро, Большой Вудъявр, р. Белая. Загрязнение водоёмов связано не только с пылением хвостохранилищ и сбросом условно очищенных вод, но и с тем, что нижние слои хвостохранилищ являются источником загрязнения грунтовых вод, а через них – водоёмов, соседствующих с хвостохранилищами [10].

Участок «Мончегорский». В окрестностях комбината «Североникель» преобладают слабые ветра (средняя скорость до 5 м/с) [8]. Гора Нюд, расположенная к югу от промплощадки комбината и стоящая на пути основных воздушных потоков, формирует местную замкнутую циркуляцию, в результате чего выбросы комбината оседают не только на её склоне, обращённом к городу, но и в самом городе. В непосредственной близости от комбината расположена зона антропогенной пустоши, где полностью уничтожен естественный растительный покров, сильно деградированы почвы. Снег в этой зоне сдувается ветром с поверхности земли, мощность снежного покрова составляет от 0 до 15 см, в то время, как на залесённых территориях его мощность в начале февраля достигала 150–190 см. На обращённых к комбинату склонах хребтов-тунтури «стёрты» различия высотных зон – от их подножья до верха также наблюдается антропогенная пустошь. По мере удаления от комбината начинают появляться древесные – ивы, берёзы. Лишь на расстоянии 10–15 км от комбината в древостоях появляются хвойные. На расстоянии примерно 20 км от комбината визуальных изменений почти нет, встречается незначительное побурение хвои в результате выпадения кислотных осадков. Однако по геохимическим данным зона влияния комбината прослеживается на 40 км и более [15–18].

Проведённый гидрохимический анализ проб снега и воды, отобранных на ключевых участках, дал следующие результаты. В настоящее время в районе исследования в радиусе 5 км вокруг комбината наблюдается значительное загрязнение природной среды. Наибольшие значения Z_c ТМ снеж-

ного покрова были зафиксированы на территории, расположенной в непосредственной близости к промплощадке – в радиусе 1–2 км, зоны значения Z_c очень высоки (более 256), по мере удаления от комбината они снижаются.

Природные особенности данного участка способствуют распространению ЗВ далеко на юг через естественный природный барьер – гору Нюд, и почти беспрепятственно, на север – по результатам нашего исследования примерно на 30 км. Загрязнение снежного покрова характерными загрязнителями комбината, хотя в гораздо меньшем объеме, чем в окрестностях промплощадки, было выявлено и в снежном покрове г. Мончегорска, чему способствуют близость комбината к городу и особенности микроциркуляции атмосферы.

Отобранные в водоёмах пробы воды в зоне воздействия комбината показали чрезвычайно опасный уровень загрязнения в окрестностях промплощадки, опасный и умеренно опасный уровни в водоёмах, расположенных в черте города или примыкающих к нему (в том числе, в зонах отдыха).

Заключение

В пределах изучаемой территории на природную среду оказывают влияние разные по масштабу, степени и характеру воздействия предприятия: комбинат Кольской ГМК «Североникель»; АО «Апатит»; также наблюдается воздействие селитебных территорий и автотранспорта.

В настоящее время наблюдается значительное загрязнение природной среды в окрестностях Мончегорского комбината (в радиусе 5 км). Природные особенности способствуют распространению ЗВ далеко на юг (на 80 и более км) и на север (примерно на 30 и более км). Наблюдается загрязнение снежного покрова характерными загрязнителями комбината, а также водоёмов в зоне воздействия комбината. По сравнению с данными опробования 30-ти, 20-ти, и 10-ти летней давности, можно отметить, что наблюдается значительно меньшее воздействие загрязнения на окружающую среду в результате деятельности комбината, что связано с его модернизацией.

В зоне воздействия горно-химической промышленности в окрестностях городов Кировска и Апатиты прослеживается загрязнение аэротехногенными поллютантами. Выявленное загрязнение г. Кировска характерными загрязнителями является в основном

результатом подземных и открытых взрывов на рудниках. Загрязнение близ пос. Титан является результатом воздействия АНОФ-3 и её хвостохранилища. Город Апатиты, особенно его северо-восточные и восточные районы, находится под влиянием деятельности АНОФ-2 и пыления хвостохранилища. Значительно загрязнены такие водные объекты, как реки Белая, Жемчужная и частично их притоки, испытывающие как прямое воздействие от деятельности горно-химических предприятий (сброс недостаточно очищенных вод), так и опосредованное (пыление хвостохранилищ).

Анализ отобранных проб на содержание ЗВ, в том числе, ТМ, показал, что окрестности бывшего посёлка Октябрьский в окрестностях южных предгорий Хибин в настоящее время не испытывают сильную антропогенную нагрузку и могут выступать как фоновые для последующих анализов качества окружающей среды. Данные могут быть исходными для дальнейших мониторинговых исследований в этих районах.

Таким образом, функционирование крупных промышленных комплексов на изучаемой территории негативно сказывается на состоянии как отдельных природных геосистем, так и на геоэкологической обстановке в центральной части Кольского полуострова в целом. Так, анализ проб показал, что загрязнение территорий и акваторий аэротехногенными поллютантами возможно на значительном удалении от источников выбросов, поэтому исследованные участки испытывают влияние не только местной промышленности, но и антропогенных источников, расположенных в других районах. Как результат, происходит суммарное воздействие целой группы различных поллютантов на экосистемы, которое может носить синергический характер.

Загрязняющие вещества, в том числе соединения металлов попадающие в экосистемы в результате функционирования промышленных комплексов и вовлекаемые в сложные природные циклы, способны накапливаться в отдельных элементах экосистем и оказывать как прямое, так и косвенное токсическое воздействие на живые организмы, в том числе, на человека.

Анализ характера антропогенных воздействий и ответных реакций биоты на них – важная составляющая охраны окружающей среды, необходимая для принятия обоснованных решений, связанных с оптимизацией хозяйственной деятельности.

Литература

1. Природа и природные ресурсы Мурманской области. Апатиты: ЦОДП, 2007. 280 с.

2. Седова Н.Б., Кочемасова Е.Ю. Экологические проблемы Арктики и их социально-экономические последствия // ЭКО. 2017. № 5. С. 160–171.

3. Заславская М.Б., Лапина Е.С. Техногенная трансформация химического состава водных объектов Норильского гидрологического района // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 13–18.

4. Воробьевская Е.Л., Седова Н.Б. Особенности зимнего рекреационного природопользования в Хибинах // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2008. № 6. С. 18–24.

5. Воробьевская Е.Л., Кириллов С.Н., Седова Н.Б., Слипичук М.В., Тульская Н.И., Цымбал М.Н. Современное природопользование в центральной части Кольского полуострова и основные геоэкологические проблемы // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 6. С. 30–35.

6. Сайт Кольского научного центра РАН [Электронный ресурс] <http://www.ksc.ru/> (Дата обращения: 04.10.2019).

7. Доклады о состоянии и об охране окружающей среды в Мурманской области в 2012, 2015, 2016, 2018 годах [Электронный ресурс] <https://mpr.govmurman.ru/> (Дата обращения: 14.10.2019).

8. Dushkova D., Evseev A. The Russian North: Environment and human health risk assessment // LNIS 6 – Lecture Notes in Information Sciences. RISK Models and Applications. 2012. No. 6. P. 89–102.

9. Экологический атлас Мурманской области. Москва; Апатиты, 1999. 48 с.

10. Евсеев А.В., Красовская Т.М. Рациональное природопользование на Кольском полуострове. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 89 с.

11. Ratkin N.E., Asming V.E., Koshkin V.V. Cartographic modelling of aerotechnogenic pollution in snow cover in the landscapes of the Kola Peninsula // Chemosphere. 2001. V. 42. No. 1. P. 1–8.

12. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobievskaya E., Sedova N., Anthropogenic pollution of the southern part of the Khibiny mountain massif and foothills // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing (UK). 2019. V. 302. No. 1. P. 1–8.

13. Nilsen T. Pollution in nikel on increase, but new technology underway. The independent barents observer [Электронный ресурс] https://thebarentsobserver.com (Дата обращения: 29.10.2019).

14. Nornickel. Strategy update 2017 – Investing in sustainable development [Press release] [Электронный ресурс] <https://www.nornickel.com> (Дата обращения: 25.10.2019).

15. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Toxic metals in soils of the Russian North // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 128–131.

16. Krasovskaya T.M., Evseev A. Technogenic load on small river watersheds in the Hibiny mountains // Chemosphere. 2001. V. 42. No. 1. P. 79–83.

17. Nordic environment finance corporation annual review 2016 [Электронный ресурс] <https://www.nefco.org> (Дата обращения: 10.09.2019).

18. Zaitsev V., Kogarko L. Sources and perspectives of REE in the Lovozero massif (Kola Peninsula, Russia) [Электронный ресурс] <http://meetingorganizer.copernicus.org/> (Дата обращения: 12.09.2019).

References

1. Nature and natural resources of the Murmansk region. Apatity: TSODP, 2007. 280 p. (in Russian).

2. Sedova N.B., Kochemasova E.Y. Environmental problems of the Arctic and their social and economic consequences // EKO. 2017. No. 5. P. 160–171 (in Russian). doi: 10.30680/ECO0131-7652-2017-5-160-171

3. Zaslavskaya M.B, Lapina E.S. Technogenic transformation of the chemical composition of water bodies of Norilsk hydrological area // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya. 2008. No. 3. P. 13–18 (in Russian).

4. Vorobyevskaya E.L., Sedova N.B. Specific features of nature management for winter recreation in the Khibiny Mountains // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2008. No. 6. P. 18–24 (in Russian).

5. Vorobyevskaya E.L., Kirillov S.N., Sedova N.B., Slipenchuk M.V., Tulskaia N.I., Tsymbal M.N. Modern natural resource management and geoecological problems in the central part of the Kola Peninsula // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2017. V. 21. No. 6. P. 30–35 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2017-6-30-35

6. The site of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences [Internet resource] <http://www.ksc.ru> (Accessed: 04.10.2019) (in Russian).

7. Reports on the state and environmental protection in the Murmansk region in 2012, 2015, 2016, 2018 [Internet resource] <https://mpr.govmurman.ru/> (Accessed: 26.10.2019) (in Russian).

8. Dushkova D., Evseev A. The Russian North: Environment and human health risk assessment // LNIS 6 – Lecture Notes in Information Sciences. RISK Models and Applications. 2012. No. 6. P. 89–102.

9. Ecological atlas of the Murmansk region. Moskva; Apatity, 1999. 48 p. (in Russian).

10. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Rational nature management on the Kola Peninsula. Moskva: MGU, 1990. 89 p. (in Russian).

11. Ratkin N.E., Asming V.E., Koshkin V.V. Cartographic modelling of aerotechnogenic pollution in snow cover in the landscapes of the Kola Peninsula // Chemosphere. 2001. V. 42. No. 1. P. 1–8.

12. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobievskaya E., Sedova N., Anthropogenic pollution of the southern part of the Khibiny mountain massif and foothills // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing (UK), 2019. V. 302. No. 1. P. 1–8. doi: 10.1088/1755-1315/302/1/01202

13. Nilsen T. Pollution in nikel on increase, but new technology underway. The independent barents observer [Internet resource] <https://thebarentsobserver.com/> (Accessed: 29.10.2019).

14. Nornickel. Strategy update 2017 – Investing in sustainable development [Press release] [Internet resource] <https://www.nornickel.com> (Accessed: 25.10.2019).

15. Evseev A.V., Krasovskaya T.M. Toxic metals in soils of the Russian North // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 128–131. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018

16. Krasovskaya T.M., Evseev A. Technogenic load on small river watersheds in the Hibiny mountains // Chemosphere. 2001. V. 42. No. 1. P. 79–83.

17. Nordic environment finance corporation annual review 2016 [Internet resource] <https://www.nefco.org> (Accessed: 10.09.2019).

18. Zaitsev V., Kogarko L. Sources and perspectives of REE in the Lovozero massif (Kola Peninsula, Russia) [Internet resource] <http://meetingorganizer.copernicus.org> (Accessed: 12.09.2019).

Состав и развитие цианобактерий Чебоксарского водохранилища и его притоков

© 2020. Е. Л. Воденеева^{1,2}, к. б. н., доцент, м. н. с.,
А. Г. Охачкин¹, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,
П. В. Куликин¹, ассистент, Н. А. Старцева¹, к. б. н., доцент,
Е. М. Шарагина¹, вед. инженер, О. О. Бондарев¹, ассистент,
Т. В. Лаврова^{1,2}, к. б. н., доцент, м. н. с.,

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23,

²Нижегородский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»,
603116, Россия, г. Нижний Новгород, Московское шоссе, д. 31,
e-mail: vodeneeva@mail.ru

На основании многолетних исследований (1966–2018 гг.) проведена оценка состава, степени развития и роли цианобактерий (ЦБ) в фитопланктоне Чебоксарского водохранилища и его притоков до зарегулирования данного участка Волги и после. Видовое богатство ЦБ было представлено 163 таксонами рангом ниже рода (4-я ранговая позиция в общей альгофлоре) и оказалось максимальным в водохранилище и системе правобережных притоков (в 1,5 раза выше, чем в левобережье). Зарегулирование стока способствовало росту общего разнообразия ЦБ – появление видов новых пяти родов, увеличение в два раза богатства рода *Dolichospermum*. Отмечено возрастание в летних альгоценозах водохранилища и устьевых участках рек абсолютных биомасс ЦБ (до 37 г/м³ на пиках развития) и их доли (в среднем речном отделе – с 7 (1969–1980 гг.) до 14% (современный период), в озёрном – с 3 до 42%), среди доминант, согласно морфо-функциональной классификации фитопланктона, отмечены представители групп Н1 (*Aphanizomenon flos-aquae*) и М (*Microcystis aeruginosa*). В малых речных экосистемах роль ЦБ была выражена слабо, что определялось особенностями их гидродинамики, а для левобережных притоков – характером водосбора, приводящем к ацидификации и гумификации водоёмов. Планируемый подъём уровня р. Волги усилит ценотические позиции ЦБ и дальнейшую смену коренных диатомово-хлорококковых комплексов на цианобактериальные, что неблагоприятно с экологических и водохозяйственных позиций.

Ключевые слова: цианобактерии, разнообразие, биомасса, массовые виды, Чебоксарское водохранилище, многолетние изменения, прогноз.

Composition and development of cyanobacteria of the Cheboksary reservoir and its tributaries (Nizhny Novgorod region)

© 2020. E. L. Vodeneeva^{1,2} ORCID: 0000-0002-9998-4809²
A. G. Okhapkin¹ ORCID: 0000-0001-7028-2785², P. V. Kulizkin¹ ORCID: 0000-0003-2701-304X²
N. A. Startseva¹ ORCID: 0000-0002-8656-9593², E. M. Sharagina¹ ORCID: 0000-0002-1670-7890²
O. O. Bondarev¹ ORCID: 0000-0002-5998-6711², T. V. Lavrova¹ ORCID: 0000-0002-3184-1406²

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
23, Gagarina Prospekt, Nizhny Novgorod, Russia, 603950,

²Nizhny Novgorod Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution
“Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography”,
31, Moskovskoe Shosse, Nizhny Novgorod, Russia, 603116,
e-mail: vodeneeva@mail.ru

As a result of cyanobacteria study in the Volga and its tributaries before and after Cheboksary reservoir construction (1966–2018) 163 species and intraspecific taxa of cyanobacteria were found. *Oscillatoriales*, *Chroococcales* and *Nostocales* were the leading orders. The genera *Oscillatoria*, *Dolichospermum*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*, *Microcystis*, *Aphanocapsa*, *Merismopedia*, *Leptolyngbya* and *Chroococcus* were the richest species. The Volga runoff regulation led to the increase in their total species richness, the appearance of species of new five genera (*Cyanothece*, *Synechocystis*, *Limnotherix*, *Spirulina*

and *Komvophoron*) and genus *Dolichospermum* almost doubled the number of species. More noticeable taxonomic and coenotic role cyanobacteria played in Cheboksary reservoir and its large tributaries mouths (3–4 positions in the general species list, 80–90% of summer biomass). The Volga runoff regulation caused an increase in the biomass of this group in the reservoir and a gradual substitution of the summer local diatom-green complexes for algal coenoses dominated by cyanobacteria (mainly *Microcystis aeruginosa* and *Aphanizomenon flos-aquae*) belonging to the group of potentially toxic species and small-sized species of genus *Aphanocapsa* below the confluence of the Oka River. Low floristic diversity and coenotic role of cyanobacteria in the upper and middle parts of small streams of the lateral inflow system of the Volga River including streams with an urbanized catchment were determined by their hydrodynamic features whereas the left-bank tributaries by their catchment features causing acidification and humification of the water bodies. Changes in the hydrological regime of the Volga River with the planned water level rise in the reservoir will trigger further increased role of cyanobacteria, which is extremely unfavorable from environmental and water management perspectives especially in the summer low-water period and in dry years with an anticyclonal weather type.

Keywords: cyanobacteria, diversity, biomass, dominant species, Cheboksary reservoir, long-term changes, prognosis.

После принятия правительством России решения о консервации уровня наполнения Чебоксарского водохранилища на существующей отметке (63 м БС) был поставлен вопрос о строительстве низконапорного гидроузла (ННПГ) и Сормовского водохранилища в верхнем речном участке водоёма [1]. Последствия таких гидротехнических мероприятий непременно отразятся на биоте водохранилища. Прежде всего, это коснётся автотрофного компонента, в котором возможна дальнейшая замена коренных диатомово-зелёных ценозов на цианобактериальные [2, 3]. Цианобактерии (ЦБ) способны вызывать «цветение» воды, имеющее самые серьёзные последствия для жизнедеятельности гидробионтов и человека. В связи с этим анализ их состава и роли в организации альгоценозов водохранилища и его притоков, является своевременным и актуальным.

Цель работы – оценить тенденции многолетних изменений таксономической и ценотической роли цианобактерий в сообществах фитопланктона Чебоксарского водохранилища и водотоков его бассейна для прогнозирования их перестроек при возможных изменениях гидрологического режима водоёма.

Материалы и методы

Материалом для работы послужили сведения о составе и развитии ЦБ, обнаруженных при изучении фитопланктона р. Волги и её притоков на трассе будущего Чебоксарского водохранилища от плотины Горьковской ГЭС до г. Чебоксары (1966–1979 гг.) [4], в первое десятилетие после зарегулирования стока (с 1981 г.) [2], а также в современный период существования (2010–2018 гг.). Карты-схемы районирования Чебоксарского водохранилища, перечень станций на нём и его притоках опубликованы ранее [2, 5, 6]. Отбор проб на притоках водохранилища про-

водили в разных участках течения, на самых крупных реках (Ока, Кудьма, Сура, Цивиль, Узла, Линда, Керженец, Ветлуга), а также в их устьевых расширениях при впадении в Волгу. Всего изучено более 30 право- и левобережных волжских притоков разного порядка, часть из которых имеет полностью урбанизированный водосбор (малые реки г. Нижнего Новгорода). Сбор альгологического материала и его обработку проводили стандартными методами [7]. Перечень руководств, используемых для определения состава ЦБ, опубликован ранее [8, 9]. При ревизии списка учтены современные номенклатурные преобразования, представленные на сайте Algaebase [10]. Оценка сходства состава ЦБ изученных водных объектов проведена с использованием коэффициента Сьёренсена, а также индекса биотической дисперсии Коха [11]. Классификацию данных выполняли с применением метода Варда, в качестве метрики использовали Евклидово расстояние. Статистическая обработка выполнена в программном пакете Statistica 8.0. Связь видового богатства и его компонентов оценивали с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s). Функциональные группы фитопланктона выделяли по работе [12] с дополнениями [13].

Результаты и обсуждение

Общее таксономическое разнообразие фитопланктона исследуемых водных объектов достаточно велико – 1800 видовых и внутривидовых таксонов с преобладанием в списке видов зелёных, диатомовых и эвгленовых водорослей. Видовое богатство ЦБ (163 таксона рангом ниже рода) составило 9,1% от общего видового списка (4-я ранговая позиция), причём в правобережных притоках их доля оказалась в 1,5 раза выше, чем в водных объектах левобережья Волги. Подобное

ранговое положение ЦБ (3–4 позиция) и их вклад (9–13%) в общее видовое богатство выявлено в Чебоксарском водохранилище в первые 10 лет его существования, в крупных и средних водотоках и в подавляющем большинстве малых рек города. Аналогичные показатели отмечались ранее для незарегулированного участка р. Волги [4], составляя на период 1960–1980 гг. 92 видовых таксона (с учётом современных изменений их систематики и номенклатуры – 63). В малых речных экосистемах в условиях заболоченного и лесного водосбора вклад ЦБ был невысоким (2–7% от общего видового богатства), уступая другим представителям альгофлоры – золотистым, динофитовым и водорослям других отделов.

Перечень ведущих по разнообразию видового состава порядков включал *Oscillatoriales* (48% общего списка видов), *Chroococcales* (35%) и *Nostocales* (17%). Наиболее богаты видами роды *Oscillatoria*, *Dolichospermum*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*, *Microcystis*, *Aphanocapsa*, *Meristopedia*, *Leptolyngbya* и *Chroococcus*, формирующие 48% общего видового богатства ЦБ.

Кластеризация данных по сходству списков ЦБ отразила максимальное сходство их состава для незарегулированной Волги и акватории водохранилища (74%), что определялось значительным воздействием поступлений водных масс из вышележащих водохранилищ Верхней и Средней Волги, привносящих в незарегулированную Волгу типично лимнофильные виды *Cyanobacteria*. Своеобразие списка ЦБ водохранилища связано с присутствием в альгофлоре видов родов *Cyanothece*, *Synechocystis*, *Limnothrix*, *Spirulina* и *Komvophoron*, которые отсутствовали в перечне, приводимом для незарегулированной Волги, а также возрастанием почти в два раза разнообразия видов рода *Dolichospermum* [9]. Степень флористической гомогенности изученной группы водных объектов исследованного участка Волжского бассейна по составу ЦБ, оценённая с использованием индекса биотической дисперсии Коха, оказалась невысокой (33%). Это отражает своеобразие экологических условий в различных водных объектах (водохранилище, незарегулированная Волга, право- и левобережные притоки, реки), в которых развиваются ЦБ.

Ценозообразующая роль ЦБ в изученных водных объектах более заметна в условиях искусственного и естественного зарегулирования их стока – в водохранилище и в устьевых участках, впадающих в него водотоков.

За весь период исследования (до зарегулирования и после создания водохранилища) пик развития ЦБ, как правило, приходился на лето (июль, август) – начало осени (третья декада сентября) при прогревании воды до 21–22 °С. В этот период наблюдался переход численности этих организмов к значениям выше 0,10 млн кл./л, а биомассы – выше 0,01 г/м³ [2]. На подъёмах биомасса ЦБ могла достигать значений, характерных для высокоэвтрофных водоёмов (до 6,0–37,0 г/м³). Пространственное распределение ЦБ данного участка Волги было неоднородным и зависело от динамики температуры и общеклиматических особенностей. Наиболее высокие значения биомассы, как правило, отмечались в верхнем речном участке. Встречаемость величин биомассы свыше 1 г/м³ в этом участке составила 38% за весь период существования водохранилища, тогда как в среднем речном аналогичный показатель равнялся 18%; в озёрном – 23%.

В процессе эксплуатации Чебоксарского водохранилища установлена тенденция к возрастанию максимальных величин биомассы ЦБ, которые в период 1969–1980 гг. достигали 29 г/м³, в первое десятилетие существования водохранилища – в отдельные годы (1982 г.) составляли 27 г/м³, в современный период происходило возрастание до 37 г/м³ (2011 г.). Отмечается явно негативная тенденция роста вклада ЦБ в общие показатели численности и биомассы фитопланктона. Их доля в биомассе альгоценозов водохранилища до устья р. Оки (верхний речной участок водохранилища) не менялась, составляя 39% в период до 1981 г., 40% – в первые десять лет существования водоёма, постепенно возрастая в современный период до 47%. В среднем речном районе водохранилища вклад ЦБ возрос в два раза (соответственно с 7 до 14%). В озёрном участке рост оказался максимальным – с 3% в период незарегулированной Волги до 29% в первые 10 лет его существования и до 42% на современном этапе эксплуатации.

В устьевых участках наиболее крупных притоков водохранилища роль ЦБ в формировании общего обилия альгоценозов оказалась в целом менее значима, чем в водохранилище. Однако в отдельные годы их биомасса в некоторых речных системах могла достигать заметных значений – до 80% от общей биомассы фитопланктона на пиках развития и до 35% от годового баланса биомассы. Например, в устье р. Суры до создания водохранилища средняя биомасса ЦБ не превышала 0,2–0,6 г/м³, после 1981 г. она резко возросла до 4,86 (1987 г.)

Таблица / Table

Биомасса, доминирующие виды и функциональные группы цианобактерий в притоках Чебоксарского водохранилища / Biomass, dominant species and functional groups of cyanobacteria in the riverbed areas of the Cheboksary reservoir's tributaries

Показатели / Indicators	Притоки / Tributaries				
	правобережные right bank		левобережные left bank		городские in the urban catchment
	большие и средние large and middle	малые small	большие и средние large and middle	малые small	
Абсолютная биомасса, г/м ³ Absolute biomass, g/m ³	0–0,26*	0–0,01	0,01–0,45	0,01–0,08	0,01–1,42
Относительная биомасса, % Relative biomass, %	0–6,31	0–4,82	0,05–7,84	0,22–9,63	0,97–36,6
Доминирующие виды Dominant species	<i>Dolichospermum</i> <i>D. affine</i> , <i>D. planctonica</i> , <i>D. spiroides</i>	бентосные виды родов <i>Oscillatoria</i> (<i>O. limosa</i>), <i>Lyngbya</i> , <i>Schizothrix</i>	<i>A. flos-</i> <i>aquae</i> , <i>Dolichosper-</i> <i>mum</i> spp.	<i>Oscillatoria</i> <i>limosa</i>	<i>A. flos-aquae</i> , <i>Dolichosper-</i> <i>mum</i> spp., <i>M. aeruginosa</i> , <i>Lyngbya</i> , <i>Oscil-</i> <i>latoria</i>
Функциональные группы Functional group of plankton	H1, M	MP	H1	MP	H1, K, M, MP

Примечание: * – дан разброс (min – max) средневегетационных величин.
Note: * – the range of average vegetational values (min – max) is given.

и 3,61 г/м³ (2011 г.) и составила 84 и 80% летней биомассы соответственно. В левобережных притоках заметное возрастание доли ЦБ отмечено в р. Узле (до 5,17 г/м³ средневегетационных значений биомассы (1988 г.)). Среди крупных притоков водоёма самые низкие доли ЦБ (0–1%) в летних альгоценозах отмечались в зоне подпора рек Оки, Ветлуги и Керженца.

В качестве массовых форм в водохранилище и устьевых участках рек отмечались *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs, *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wessenbergii* (Komárek) Komárek, *Dolichospermum flos-aquae* (Bréb. ex Born. et Flah.) Wacklin et al. и *D. planctonicum* (Brunnth.) Wacklin et al. В данном перечне первые два вида являются наиболее часто встречаемыми возбудителями «цветения» воды в волжских водохранилищах и относятся к группе потенциально токсичных видов. Однако сведения о содержании токсинов ЦБ в Чебоксарском водохранилище недостаточны. Так, в июле 2010 г. в биомассе фитопланктона трёх волжских водохранилищ (Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское) были обнаружены 13 представителей микроцистинов и анабенопептины, в том числе микроцистин-LR, максимальная концентрация которого, превышающая допустимые ВОЗ нормы, отмечена в Чебоксарском водохранилище (устье р. Суры) [14]. Исходя из

морфо-функциональной классификации [13], большая часть доминант ЦБ Чебоксарского водохранилища принадлежит к группам H1 (*Dolichospermum* spp., *A. flos-aquae*) и M (*Microcystis* spp.), представляющим комплексы видов, чувствительных к перемешиванию, толерантных к световому лимитированию и низкому содержанию азота. В отличие от водохранилища и устьевых участков крупных водотоков, в русловых частях этих рек, а также в небольших по протяжённости водотоках правого и левого бережья (особенно в условиях заболоченного и залесённого ландшафта) роль ЦБ как доминантов и субдоминантов альгоценозов была выражена слабо (табл.). По-видимому, главными факторами, лимитирующими их развитие, оказались гидродинамические процессы, а также гидрохимический режим, обусловленный особенностями водосбора. Так, в группе левобережных притоков достоверная положительная связь ($r_s = 0,56$) получена между абсолютной биомассой ЦБ и pH воды и отрицательная ($r_s = -0,61$) – между их биомассой и цветностью. Встречающиеся в небольших по протяжённости водотоках виды-доминанты (например, *O. limosa* J. Agardh – до 0,79 г/м³) относятся к представителям бентосно-литеральных группировок, попадающих в планктон вследствие турбулентности.

Согласно морфофункциональной классификации – это виды группы МР, предпочитающие часто перемешиваемые, из-за неорганических соединений мутные мелководные водоёмы (табл.). В крупных реках (например, в Ветлуге, Кудьме) в отдельные годы отмечалось доминирование волжского цианобактериального комплекса с преобладанием по численности и биомассе видов рода *Dolichospermum*, *A. flos-aquae* (группа Н1) и *M. aeruginosa* (группа М).

Средневегетационная биомасса и вклад ЦБ в этот показатель в альгоценозах городских водотоков изменялись в широких пределах (табл.). Часть из них имеют прудовые расширения, что благоприятствует развитию ценоотических прудовых комплексов с доминированием *A. flos-aquae* (до 7,56 г/м³), *Limnothrix planctonica* (Wolosz.) Meffert, *Dolichospermum spiroides* (Kleb.) Wacklin et al. Кроме того, в нижних участках течения некоторых рек, где подтопление и изменение гидрологического режима со стороны Чебоксарского водохранилища способствовало развитию ЦБ, в период максимального прогрева воды развивались виды р. *Microcystis* (до 0,13 г/м³), *A. flos-aquae*, *Pseudanabaena limnetica* (Lemmerm.) Komárek и *P. mucicola* (Naumann et Hub.-Pest.) Schwabe, которые иногда выступали в качестве доминантов в летний сезон. На проточных участках рек присутствовали планктонно-бентосные и литоральные виды родов *Phormidium*, *Pseudanabaena*, *Oscillatoria* и *Lyngbya*, которые могли попасть в планктон вследствие турбулентности, однако доминантами или субдоминантами они были достаточно редко.

Заключение

Таким образом, в исследуемой речной системе ЦБ играли наиболее заметную таксономическую и ценоотическую роль в Чебоксарском водохранилище и его крупных притоках (преимущественно в устьевых участках), где они занимали 3–4 позицию в общем видовом списке и формировали на пиках развития до 80–90% летней биомассы. Зарегулирование стока р. Волги способствовало росту общего видового богатства ЦБ (появление видов новых пяти родов, увеличение почти в два раза разнообразия рода *Dolichospermum*) и возрастанию их ценоотической роли в летних альгоценозах водохранилища с заменой коренных диатомо-зелёных комплексов. Основными доминантами по численности и биомассе расти-

тельных планктонных сообществ среди ЦБ выступали тривиальные для каскада волжских водохранилищ виды – *Microcystis aeruginosa* и *Aphanizomenon flos-aquae*, относящиеся к группе экологически опасных, токсичных видов, а в р. Оке и ниже её впадения – также мелкоклеточные виды рода *Aphanocapsa*. Невысокие флористическое разнообразие и ценоотическая роль ЦБ в верхних и средних участках водотоков системы боковой приточности р. Волги, в том числе в малых по протяжённости реках и в водотоках с урбанизированным водосбором, определялись особенностями их гидродинамики, а для левобережных притоков – характером водосбора, приводящем к ацидификации и гумификации водоёмов. Дальнейший подъём уровня р. Волги усилит ценоотические позиции ЦБ, что неблагоприятно с экологических и водохозяйственных позиций, особенно в период летней межени и в маловодные годы с антициклональным типом погоды.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РГО «Экспедиция Плавающий университет Волжского бассейна» (договор № 02/2019-Р). Статья опубликована при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

Литература

1. Шурганова Г.В., Охупкин А.Г., Гаврилко Д.Е., Воденеева Е.Л., Кудрин И.А., Пухнаревич Д.А., Нижегородцев А.А., Гелашвили Д.Б. Современное состояние и прогноз изменения сообществ гидробионтов в зоне строительства Нижегородского низконапорного гидроузла // Самарский научный вестник. 2017. Т. 6. № 4 (21). С. 103–109.
2. Охупкин А.Г. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 1994. 275 с.
3. Охупкин А.Г., Шарагина Е.М., Бондарев О.О. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища на современном этапе его существования // Поволжский экологический журнал. 2013. № 2. С. 190–199.
4. Юлова Г.А. Фитопланктон р. Волга от Городца до Чебоксар: Дисс. ... канд. биол. наук. Горький, 1982. 288 с.
5. Гелашвили Д.Б., Охупкин А.Г., Доронин А.И., Колкутин В.И., Иванов Е.Ф. Экологическое состояние водных объектов Нижнего Новгорода. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. 414 с.
6. Воденеева Е.Л. Динамика биомассы и доминирующие виды фитопланктона в водных объектах заповедника «Керженский» // Труды ГПБЗ «Керженский». Н. Новгород, 2006. Т. 3. С. 46–57.

7. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов. М.: Наука, 1975. 239 с.
8. Okhapkin A.G., Genkal S.I., Sharagina E.M., Vodeneeva E.L. Structure and dynamics of phytoplankton in the Oka river mouth at the beginning of the 21th century // *Inland Water Biology*. 2014. V. 7. No. 4. P. 357–365.
9. Охалкин А.Г., Воденева Е.Л., Бондарев О.О. Видовой состав синезеленых водорослей планктона Чебоксарского водохранилища (Нижегородская область) // *Algologia*. 2015. Т. 25. № 3. С. 265–277.
10. Guiry M.D., Guiry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, University of Ireland, Galway. 2019 [Электронный ресурс] <http://www.algaebase.org> (Дата обращения: 03.12.2019).
11. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
12. Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // *Journal of Plankton Research*. 2002. V. 24. No. 5. P. 417–428.
13. Padisák J., Crossetti L.O., Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // *Hydrobiologia*. 2009. V. 621. P. 1–19.
14. Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Жаковская З.А., Русский Я.В., Чернова Е.Н. Фитопланктон и содержание цианотоксинов в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в период аномально жаркого лета 2010 г. // *Вода: химия и экология*. 2014. № 8. С. 24–29.
4. Yulova G.A. Phytoplankton of Volga River from Gorodetz city to Cheboksary: Cand. of biol. diss. Gorky, 1982. 288 p. (in Russian).
5. Gelashvili D.B., Okhapkin A.G., Doronin A.I., Kolkutin V.I., Ivanov E.F. Ecological state of water objects in Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod: NNGU, 2005. 414 p. (in Russian).
6. Vodeneeva E.L. Biomass' dynamics and dominant species of phytoplankton in water objects of Kerzhensky Nature Reserve // *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika "Kerzhenskiy"*. Nizhny Novgorod: GPBZ "Kerzhenskiy", 2006. V. 3. P. 46–57 (in Russian).
7. Mordukhai-Boltovskoi Ph.D. Methods of studying biogeocenoses in inland water bodies. Moskva: Nauka, 1975. 239 p. (in Russian).
8. Okhapkin A.G., Genkal S.I., Sharagina E.M., Vodeneeva E.L. Structure and dynamics of phytoplankton in the Oka river mouth at the beginning of the 21th century // *Inland Water Biology*. 2014. V. 7. No. 4. P. 357–365. doi: 10.1134/S1995082914040142
9. Okhapkin A.G., Vodeneeva E.L., Bondarev O.O. Species composition of blue-green alges in plankton of Cheboksary reservoir (Nizhny Novgorod region) // *Algologia*. 2015. V. 25. No. 3. P. 265–277 (in Russian). doi: 10.15407/alg25.03.265
10. Guiry M.D., Guiry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, University of Ireland, Galway. 2019 [Internet recourse] www.algaebase.org (Accessed: 03.12.2019).
11. Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative Hydroecology: methods of system identification. Tolyatti: IEVB RAN, 2003. 463 p. (in Russian).
12. Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // *Journal of Plankton Research*. 2002. V. 24. No. 5. P. 417–428.
13. Padisák J., Crossetti L.O., Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates // *Hydrobiologia*. 2009. V. 621. P. 1–19. doi: 10.1007/s10750-008-9645-0
14. Korneva L.G., Solovyova V.V., Zhakovskaya Z.A., Russkikh Ya.V., Chernova E.N. Phytoplankton and content of cyanotoxins in Rybinskoe, Gor'kovskoe and Cheboksarskoe reservoirs during the period of abnormally hot summer of 2010 // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2014. No. 8. P. 24–29 (in Russian).

References

**Физиолого-биохимические и генетические параметры
в популяциях лишайника *Physcia stellaris* Nyl.
в зависимости от уровня загрязнения**

© 2020. Р. Г. Фархутдинов, д. б. н., доцент, З. Р. Сaitова, аспирант,
Б. Р. Кулуев, д. б. н., доцент, А. С. Григориади, к. б. н., доцент,
В. В. Федяев, к. б. н., доцент, М. И. Гарипова, д. б. н., доцент,
Е. И. Новоселова, д. б. н., доцент, А. А. Ямалеева, д. б. н., профессор,
Башкирский государственный университет,
450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32,
e-mail: frg2@mail.ru

Представлены данные о влиянии загрязняющих факторов одного из крупнейших промышленных центров Республики Башкортостан – г. Стерлитамака, на состояние лишенофлоры в городе и за его пределами. Исследованы изменения морфологических показателей таллома и активности физиолого-биохимических процессов у *Physcia stellaris* Nyl. Анализ гемагглютинирующей активности (ГАА) лектинов показал увеличение содержания этих белков в образцах, собранных в городе и в пригороде в северо-северо-восточном направлении. Лишайники, обитающие в городе, характеризовались сравнительно низкой дыхательной активностью. В талломах лишайников, произрастающих в условиях воздействия повышенных концентраций токсических соединений, отмечено увеличение содержания пролина. Талломы лишайников в пробах юго-юго-западного, юго-западного и северного направления отличались повышенной микробной обсеменённостью. Анализ генетической изменчивости популяций *Physcia stellaris* с использованием RAPD-маркёров выявил различия в генетической структуре популяций в зависимости от условий произрастания.

Ключевые слова: лишайник, лектины, пролин, общая микробная обсеменённость лишайников, полиморфизм, RAPD-анализ.

**Physiological, biochemical, and genetic parameters of the lichen
Physcia stellaris Nyl. populations depending on the level of pollution**

© 2020. R. G. Farkhutdinov ORCID: 0000-0002-2541-8994, Z. R. Saitova ORCID: 0000-0001-7802-1379,
B. R. Kuluev ORCID: 0000-0002-1564-164X, A. S. Grigoriadi ORCID: 0000-0001-6891-1693,
V. V. Fedyaev ORCID: 0000-0003-3373-9445, M. I. Garipova ORCID: 0000-0001-7157-6806,
E. I. Novoselova ORCID: 0000-0001-6386-5114, A. A. Yamaleeva ORCID: 0000-0001-9546-0461,
Bashkir State University,
32, Z. Validi St., Ufa, Russia, 450076,
e-mail: frg2@mail.ru

The data on the pollution influence on the lichen flora state in the largest industrial center of the Republic of Bashkortostan – Sterlitamak, are presented. Changes of morphological parameters and activity of physiological and biochemical processes activity in *Physcia stellaris* thalli growing in the city habitats and beyond were studied. An analysis of the morphometric parameters showed that lichens growing in the areas of prevailing winds from the city experienced a decrease in biomass accumulation, thallus length, and a decrease in the number of apothecia and lobes. Analysis of the hemagglutinating activity (GAA) of lectins showed an increase in the content of these proteins in samples collected in the city and in the suburbs in the north-north-east direction. Lichens living in the city were characterized by relatively low respiratory activity, which may be due to the stabilizing, adaptogenic role of lectins under the influence of adverse conditions. Samples collected in the north, north-north-east and south directions had the highest oxygen consumption rate, which may be associated with respiratory costs for adaptation to environmental pollution. The increase in the proline content was revealed in the lichen thalli growing in the territories polluting by the toxic compounds. The samples of lichens from the south-south-west, south-west and northern areas were characterized by high microbial contamination. Analysis of genetic variability using RAPD markers revealed differences in the genetic structure of *Physcia stellaris* populations depending on growing conditions. The cluster of lichens from the northern and southern directions was identified, which generally compares with the data on the wind rose and our data on the level of pollution, morpho-

physiological and biochemical parameters. Thus, we revealed the changes in activity of physiological and biochemical processes aimed at increasing the stability of the lichen's symbiotic organism in areas affected by industrial emissions of the city of Sterlitamak.

Keywords: lichen, lectins, proline, total microbial contamination of lichens, polymorphism, RAPD analysis.

Антропогенное воздействие городской среды вызывает изменения видового состава растительности и приводит к внутривидовой изменчивости. Особенно чувствительным к загрязнениям компонентом флоры является симбиотический организм – лишайник [1]. Под воздействием различных поллютантов меняется не только видовой состав лишайнофлоры, но и морфологические и физиологические показатели таллома лишайника [2–5]. Изучение межпопуляционного полиморфизма, наряду с исследованиями систематики, геоботанического описания популяций и определения активности физиолого-биохимических процессов позволяет более полно оценить адаптивный потенциал организмов [6]. Одним из наиболее универсальных методов для оценки генетического полиморфизма популяций любых живых организмов является RAPD-анализ [7]. Однако сведений о генетическом полиморфизме и особенностях адаптивных механизмов физиолого-биохимического уровня у лишайников крайне мало.

Целью данной работы был анализ морфологических, физиологических, биохимических и генетических изменений лишайника *Physcia stellaris* Nyl. в зависимости от уровня промышленного загрязнения.

Материалы и методы исследования

Исследования лишайнофлоры г. Стерлитамак (Республика Башкортостан) и за его окрестностями (до 50±5 км от города) проводили в направлениях основных господствующих ветров в 2016–2018 гг.

Стерлитамак – крупный промышленный город, на территории которого расположены предприятия энергетического, химического и нефтехимического комплексов, вызывающих загрязнение атмосферы воздуха (индекс загрязнения атмосферы за 2016–2018 гг. в среднем составлял 3,6). В этот период в г. Стерлитамаке преобладали ветра юго-юго-западного, южного и северного направлений (рис. 1).

Следовательно, основное движение воздушных масс и перенос газовых и аэрозольных выбросов от стационарных источников загрязнения и от транспортных средств г. Стерлитамаке осуществляется в направлениях

северо-северо-восточном (ССВ), северном (С), северо-восточном (СВ) и южном (Ю).

Объектом для исследования был выбран распространённый и наиболее устойчивый к антропогенным воздействиям лишайник *Physcia stellaris* Nyl. [1]. Лишайники собирали в генеративном возрастном состоянии в сухую погоду на одноствольных деревьях липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) и готовили материал как было описано ранее [5, 8]. Скорость дыхания измеряли методом открытой манометрии [9]. Содержание свободного пролина определяли по методу [10], лектинов – по методике [11].

Для оценки общей микробной обсеменённости лишайников в стерильных условиях измельчали 1 г таллома и проводили ряд разведений. Численность микроорганизмов определяли по общепринятому методу посева суспензии на агаризованные среды [12]. В работе использовали готовый сухой питательный агар (СПА) производства ФГУП «НПО «Микроген» (для определения численности гетеротрофных микроорганизмов) и минимальную минеральную среду Дрю (для определения численности цианобактерий).

ДНК из лишайников выделяли с использованием цетилтриметиламмоний бромида

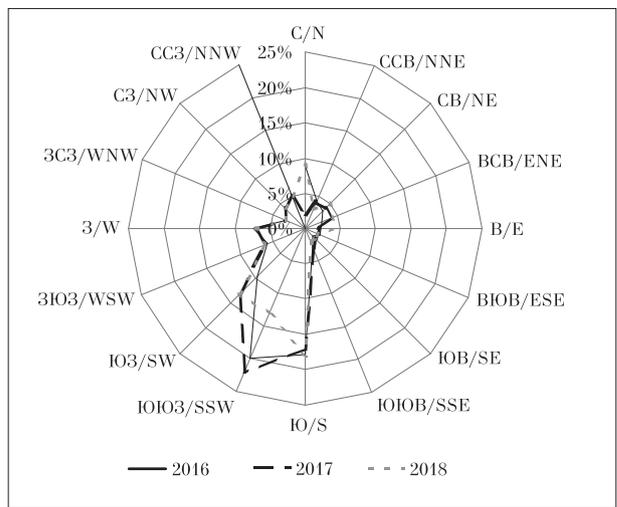


Рис. 1. Роза ветров в 2016–2018 гг. в г. Стерлитамаке (по данным Башкирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды)
Fig. 1. Rose of winds in 2016–2018 in the city of Sterlitamak (according to the Bashkir Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring)

(СТАВ). Качество выделенной тотальной ДНК определяли при помощи электрофореза в 1% агарозном геле. RAPD-анализ проводили с использованием универсальных праймеров AFK1 (ACGGTGGACG) и LMBD (GGGC-GCTG) [13], которые были синтезированы в ООО «Евроген» (Россия). Реакционная смесь для RAPD-анализа объёмом 30 мкл содержала следующие компоненты: 1 ед. Taq-полимеразы («Евроген», Россия), 3 мкл 10-кратного буфера Taq-полимеразы, MgCl₂ (5 мМ), 0,25 мМ каждого dNTP, 90 пМ праймера, 0,2–0,5 мкг тотальной ДНК. Смесь покрывали 20 мкл минерального масла и оставляли для проведения реакции в амплификаторе производства компании «ДНК-технология» (Россия) по следующему протоколу: начальная денатурация – 3 мин при 94 °С; 35 циклов: денатурация при 94 °С – 50 с, температура отжига 30 °С – 50 с и элонгация при 72 °С 1 мин 40 с; заключительная элонгация 7 мин при 72 °С.

Все эксперименты проводили не менее чем в трёх биологических повторностях, физиолого-биохимические анализы – в пяти повторностях для каждого варианта. Статистическую обработку полученных данных выполняли в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Известно, что под действием господствующих ветров из города, происходит изменение морфометрических показателей лишайников (снижение накопления биомассы, длины таллома, уменьшение числа апотеций и лопастей) [14], однако влияние неблагоприятных факторов не ограничивается воздействием на ростовые характеристики, но и затрагивает физиолого-биохимические процессы и симбиотические взаимоотношения в талломе лишайника.

Анализ общей бактериальной обсеменённости показал, что только в трёх образцах лишайников, отобранных по таким направлени-

ям, как ЮЮЗ, ЮЗ и С, обнаруживались достоверные значения численности микроорганизмов (табл. 1). В остальных пробах рост микроорганизмов на используемых средах не наблюдался. Как известно, таллом лишайников является сложно организованной экосистемой со своими специфическими уровнями регуляции численности, таксономического разнообразия и активности [15]. Среди факторов, влияющих на количественный и качественный состав микробного населения лишайников, кроме ролевых взаимоотношений микробиоценоза таллома [15], важную роль играют внешние экологические условия [16]. Учитывая, что секторы ЮЮЗ и ЮЗ направления розы ветров являются зонами, наименее подверженными воздействию поллютантов, следовало ожидать роста как таллома лишайника, так и сопутствующей микрофлоры. Однако микрофлора достаточно активно развивалась у лишайника, обитающего в секторе С. Причина этого не вполне ясна. Первичный скрининг микрофлоры с помощью методов прямого высева на питательные среды является менее селективным и не позволяет точно установить систематическое положение прокариот по сравнению с молекулярно-генетическими методиками.

Изучение дыхания показало, что образцы лишайника, собранные в городе, поглощали на 30% меньше кислорода, чем образцы на ЮЮЗ (табл. 2). В то же время, образцы, собранные в направлениях С, ССВ и Ю, характеризовались наиболее высокой скоростью потребления кислорода. Следовательно, в окрестностях Стерлитамака наибольшее потребление кислорода было характерно для талломов из районов с наибольшим загрязнением, что в целом согласуется с данными литературы [2]. Одним из индикаторов стресса может служить наличие пролина, накапливающегося в талломе лишайника при воздействии различных поллютантов [17]. Определения пролина в талломах показало его повышенное содержание в образцах из

Таблица 1 / Table 1
Численность бактерий в образцах лишайника *Physcia stellaris*, n · 10⁴ КОЕ/г таллома
The number of bacteria in samples of the lichen *Physcia stellaris*, n · 10⁴ CFU/g of thallus

Направление отбора образца, удалённость от города – 10 км Direction of sampling, distance 10 km from city	Гетеротрофные бактерии Heterotrophic bacteria	Цианобактерии Cyanobacteria
ЮЮЗ / SSW	10,70±1,45	6,3±0,9
ЮЗ / SW	21,0±3,9	9,3±1,1
С / N	11,70±1,75	6,1±1,3

Таблица 2 / Table 2

Гемагглютинирующая активность (ГАА) лектинов, скорость дыхания и содержание пролина в талломах *Physcia stellaris* / Hemagglutinating activity (HAA) of lectins, respiratory rate, and proline content in *Physcia stellaris* thalli

Место сбора материала The place of material collection	Скорость дыхания, мкл O ₂ /(г · ч) / Respiratory rate, μlO ₂ /(g · h)	Содержание пролина, мг/г сухой массы / Proline content, mg/g DW	ГАА лектинов HAA of lectins
Город / City	373,76±40,58	4,26±0,15	8
Север / North	760,92±47,89	4,13±0,43	4
Север-северо-восток North-north-east	814,49±41,39	3,82±0,25	8
Юг / South	782,83±38,15	3,76±0,33	4
Юг-юго-запад South-south-west	549,08±25,97	2,89±0,13	4

Примечание: * ГАА лектинов – разведение пробы, дающее чёткую реакцию агглютинации.

Note: HU – Hemagglutinating unit – a dimensionless value equal to the dilution of the sample, giving a clear agglutination reaction.

мест с повышенным антропогенным воздействием (табл. 2).

Определение содержания лектинов в талломах лишайников, произрастающих в условиях города и ССВ показало повышение уровня ГАА (табл. 2). Известно, что при воздействии неблагоприятных условий наблюдается значительное увеличение лектиновой активности, что связывают с их стабилизирующей и адаптивной ролью [18].

Таким образом, повышение дыхательной активности, накопление пролина, лектинов, а также ранее установленные нами изменения в гормональном и антиоксидантном статусе [5] свидетельствуют о формировании определённых адаптационных признаков у лишайников при длительном воздействии внешних факторов среды (более 70 лет активной работы нефтехимических предприятий города).

Учитывая достаточно «малополюсную розу ветров» г. Стерлитамака можно предположить, что в направлениях ССВ, С и ЮЮЗ должны были сложиться благоприятные условия для формирования стрессоустойчивых популяций лишайника *P. stellaris*.

В настоящее время для анализа популяций используются разнообразные методы: от классических – морфологических, до современных – молекулярно-генетических. Однако многие виды лишайников не имеют однозначных внутривидовых морфологических признаков [19]. Для генетического анализа *P. stellaris* нами были применены универсальные RAPD-праймеры AFK и LMBD, использованные ранее при изучении микроорганизмов [20]. По результатам RAPD-анализа при помощи программы Treecop построена дендрограмма сходства (рис. 2). Для получения достоверных

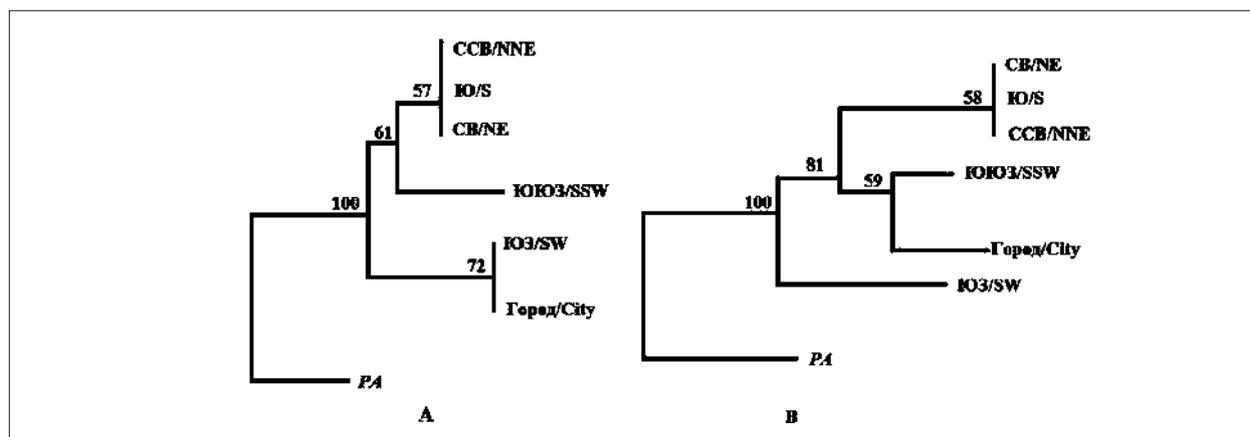


Рис. 2. Построенная по результатам RAPD-анализа ДНК талломов дендрограмма сходства между собранными в различных местностях отдельными образцами *Physcia stellaris*. А – LMBD, В – AFK, СВ – северо-восток, Ю – юг, ССВ – север-северо-восток, ЮЮЗ – юг-юго-запад, ЮЗ – юго-запад, ПА – *Physcia aipolia* (Ehrh.)

Fig. 2. Hierarchical clustering between individual *Physcia stellaris* samples collected in different areas, based on the results of RAPD analysis of DNA from thalli. NE – north-east, NNE – north-north-east, SSW – south-south-west, SW – south-west, PA – *Physcia aipolia* (Ehrh.)

различий внутри вида, в программе необходимо было использовать референсный вид, близкий к исследуемому. В качестве референсного вида мы выбрали *Physcia aipolia* (Ehrh.).

Филогенетический анализ показал, что при использовании праймеров АФК и LMBD популяции вида *P. stellaris*, произрастающие на ССВ, Ю и СВ наиболее близки и образуют первый кластер, но имеются определённые различия при использовании разных праймеров. Популяции ЮЮЗ и города в случае применения АФК-праймера также близки и объединяются во второй кластер, но при этом имеют различия. При применении LMBD-праймера популяции ЮЗ и города образуют третий кластер, более отдалённый от первого кластера, популяция ЮЮЗ отделяется в отдельный второй кластер наиболее близкий к кластеру популяции ССВ, Ю и СВ. В случае АФК-праймера третий кластер образует популяция ЮЗ. Полученные результаты могут свидетельствовать об изменениях в генетической структуре популяций в зависимости от условий произрастания. Полученная нами дендрограмма может быть отражением изменений как в геноме фотобионта (*Trebouxia impressiona*), так и микобионта (не установлен). Как разделяются исследованные нами лишайники на популяции, нам точно неизвестно, главное их отличие – это место сбора, а, следовательно, уровень загрязнения. Исходя из этих соображений, а также от того, что для анализа использовалась тотальная ДНК, нельзя исключать изменения в составе микрофлоры, населяющей талломы лишайников. При этом большая часть микрофлоры может состоять из некультивируемых бактерий, и методом посева они могут и не выявляться. Результатом RAPD-анализа, на который следует обратить наибольшее внимание, это выделение кластера лишайников из северного и южного направлений, что в целом соотносится с данными по розе ветров и с нашими данными по уровню загрязнения, оцениваемого по морфофизиологическим и биохимическим параметрам. Следовательно, метод RAPD-анализа может быть применён для оценки генетического полиморфизма популяций лишайников, в том числе, распределённых по принципу разных экологических условий произрастания.

Заключение

Обитание *P. stellaris* в различных экологических условиях приводило к изменению активности физиолого-биохимических про-

цессов. В секторах «розы ветров», подверженных влиянию промышленных выбросов города, нам удалось выявить изменения активности физиолого-биохимических показателей, направленные на повышение устойчивости симбиотического организма лишайника. Исследованные нами физиологические, биохимические и генетические показатели должны использоваться при оценке действия долгосрочных загрязняющих факторов, применения только ростовых параметров, как это принято обычно при лишеноиндикации, для этой цели явно недостаточно.

Литература

1. Суетина Ю.Г. Структура популяции эпифитного лишайника *Physcia stellaris* (L.) Nyl. на территории города Йошкар-Олы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3–2. С. 796–798.
2. Домнина Е.А., Шапиро И.А., Быков О.Д. Изменение фотосинтеза и дыхания лишайников в районе Кирово-Чепецкого химического комбината // Ботанический журнал. 2007. Т. 92. № 4. С. 515–523.
3. Головки Т.К., Шелякин М.А., Захожий И.Г., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н. Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таёжной зоне // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 44–53.
4. Михайлова И.Н., Микрюков В.С., Фролов И.В. Состояние сообществ эпифитных лишайников в условиях антропогенных нагрузок: влияние методов учёта обилия на информативность показателей // Экология. 2015. № 6. С. 427–433.
5. Фархутдинов Р.Г., Саитова З.Р., Шпирная И.А., Зайцев Д.Ю., Шарипова Г.В. Гормональный и антиоксидантный статус популяций *Physcia stellaris* (L.) произрастающих в разных природных зонах Республики Башкортостан // Вестник Томского государственного ун-та. Биология. 2018. № 42. С. 176–191.
6. Трифонова, А.А., Кочиева Е.З., Кудрявцев А.М. Низкий уровень подразделенности популяций редкого вида *Allium regelianum* А.К. Becker ex. Пјin Волгоградской области на основе данных ISSR анализа // Экологическая генетика. 2017. Т. 15. № 1. С. 30–37.
7. Кулуев Б.Р., Баймиев Ан.Х., Геращенко Г.А., Чемерис Д.А., Зубов В.В., Кулуев А.Р., Баймиев Ал.Х., Чемерис А.В. Методы ПЦР для выявления мультилокусного полиморфизма ДНК у эукариот, основанные на случайном праймировании // Генетика. 2018. Т. 54. № 5. С. 495–511.
8. Михайлова В.А., Саитова З.Р., Фархутдинов Р.Г. Особенности видового состава лишенобиоты Башкортостана // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18. № 2. С. 392–394.

9. Рахманкулова З.Ф., Федяев В.В., Подашевка О.А., Усманов И.Ю. Альтернативные пути дыхания и вторичный метаболизм у растений с разными типами адаптивных стратегий при дефиците элементов минерального питания // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 2. С. 231–237.

10. Рахманкулова З.Ф., Шуйская Е.В., Щербаков А.В., Федяев В.В., Биктимерова Г.Я., Хафизова Р.Р., Усманов И.Ю. Содержание пролина и флавоноидов в побегах галофитов, произрастающих на территории Южного Урала // Физиология растений. 2015. Т. 62. № 1. С. 79–88.

11. Ямалева А.А. Лектины растений и их биологическая роль. Уфа: Изд-во Башкирского ун-та, 2001. 204 с.

12. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1991. 304 с.

13. Кулуев Б.Р., Швец Д.Ю., Голованов Я.М., Пробатова Н.С. Тладианта сомнительная (*Thladiantha dubia*, Cucurbitaceae) в Башкортостане – опасный сорняк с высоким инвазионным потенциалом // Российский журнал биологических инвазий. 2019. № 1. С. 66–78.

14. Сайтова З.Р., Фархутдинов Р.Г., Федяев В.В., Гарипова М.И., Шпирная И.А., Ямалева А.А. Влияние оксида серы (VI) на физиолого-биохимические процессы у лишайника *Physcia stellaris* (L.) Nyl. города Стерлитамак и его окрестностей // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3 (5). С. 25–29.

15. Панкратов Т.А., Качалкина А.В., Корчиков Е.С., Добровольская Т.Г. Микробные сообщества лишайников // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 265–283.

16. Cardinale M., Grube M., Castro J.V. Jr., Mueller H. Bacterial taxa associated with the lung lichen *Lobaria pulmonaria* are differentially shaped by geography and habitat // FEMS Microbiol. Lett. 2012. V. 329. P. 111–115.

17. Backor M., Fahsel D., Wu C.T. Free proline content is positively correlated with copper tolerance of the lichen photobiont *Trebouxia erici* (Chlorophyta) // Plant Science. 2004. V. 167. P. 151–157.

18. Цивилева О.М., Никитина В.Е., Гарибова Л.В. Влияние состава среды культивирования на активность внеклеточных лектинов *Lentinus edodes* // Прикладная биохимия и микробиология. 2005. Т. 41. № 2. С. 200–203.

19. Printzen C. Fungal specific primers for PCR-amplification of mitochondrial LSU in lichens // Mol. Ecol. Notes. 2002. V. 2. P. 130–132.

20. Баймиев Ан.Х., Птицын К.Г., Благова Д.К., Мулдашев А.А., Баймиев Ал.Х. Генетическое разнообразие и филогения клубеньковых бактерий, вступающих в симбиоз с чиной весенней *Lathyrus vernus* (L.) Bernh. // Микробиология. 2011. Т. 80. № 1. С. 100–104.

akademii nauk. 2013. V. 15. No. 3–2. P. 796–798 (in Russian).

2. Domnina E.A., Shapiro I.A., Bykov O.D. Lichens photosynthesis and respiration changes in the vicinity of Kirovo-Chepetskii chemical factory // Botanicheskiy zhurnal. 2007. V. 92. No. 4. P. 515–523 (in Russian).

3. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Zakhzhiziy I.G., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. The reaction of lichens to environmental pollution during the extraction of bauxite ore in the taiga zone // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1

4. Mikhaylova I.N., Mikryukov V.S., Frolov I.V. State of epiphytic lichen communities under anthropogenic impact: Effect of abundance assessment methods on the informativity of indices // Ekologia. 2015. V. 46. No. 6. P. 531–536 (in Russian). doi: 10.7868/S0367059715060116

5. Farkhutdinov R.G., Saitova Z.R., Shpirnaya I.A., Zaytsev D.Yu., Sharipova G.V. Hormonal and antioxidant status of *Physcia stellaris* (L.) Nyl. populations growing in different natural zones of the Republic of Bashkortostan // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo un-ta. Biologiya. 2018. No. 42. С. 176–191 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/42/9

6. Trifonova, A.A., Kochieva E.Z., Kudryavtsev A.M. Low level of genetic differentiation among populations of the rare species *Allium regelianum* A.K. Becker ex Iljin from the Volgograd region detected by ISSR-analysis // Ekologicheskaya genetika. 2017. V. 15. No. 1. P. 30–37 (in Russian). doi: 10.17816/ecogen15130-37

7. Kuluev B.R., Baymiev An.Kh., Gerashchenkov G.A., Chemeris D.A., Zubov V.V., Kuluev A.R., Baymiev Al.Kh., Chemeris A.V. Random priming PCR-methods for identifying multilocus polymorphism of DNA in eukaryotes // Genetika. 2018. V. 54. No. 5. P. 495–511 (in Russian). doi: 10.7868/S0016675818050016

8. Mikhaylova V.A., Saitova Z.R., Farkhutdinov R.G. Features of the species composition of lichen biota of Bashkortostan // Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2013. V. 18. No. 2. P. 392–394 (in Russian).

9. Rakhmankulova Z.F., Fedyaev V.V., Podashevka O.A., Usmanov I.Yu. Alternative respiration pathways and secondary metabolism in plants with different types of adaptive strategies in case of deficiency of mineral nutrition elements // Fiziologiya rasteniy. 2003. V. 50. No. 2. P. 231–237 (in Russian). doi: 10.1023/a:1022973130775

10. Rakhmankulova Z.F., Shuyskaya E.V., Shcherbakov A.V., Fedyaev V.V., Biktimerova G.Ya., Khafizova R.R., Usmanov I.Yu. The content of proline and flavonoids in the shoots of halophytes growing in the territory of the Southern Urals // Fiziologiya rasteniy. 2015. V. 62. No. 1. P. 79–88 (in Russian). doi: 10.7868/S001533031501011X

11. Yamaleeva A.A. Plant lectins and their biological role. Ufa: Izd-vo Bashkirskogo un-ta, 2001. 204 p. (in Russian).

12. Methods of soil microbiology and biochemistry / Ed. D.G. Zvyagintsev. Moskva: MGU, 1991. 304 p. (in Russian).

References

1. Suetina Yu.G. The structure of epiphytic lichen *Physcia stellaris* (L.) Nyl. population in Yoshkar-Ola city // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy

13. Kuluev B.R., Shvets D.Yu., Golovanov Ya.M., Probatova N.S. The dubious radiant (*Thladiantha dubia*, Cucurbitaceae) in Bashkortostan is a dangerous weed with a high invasive potential // Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy. 2019. No. 1. P. 66–78 (in Russian).
14. Saitova Z.R., Farkhutdinov R.G., Fedyaev V.V., Garipova M.I., Shpirnaya I.A., Yamaleeva A.A. Effect of sulfur oxide(VI) on physiological and biochemical processes in lichen *Physcia stellaris* (L.) Nul. the city of Sterlitamak and its environs // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2018. No. 3 (5). P. 25–29 (in Russian).
15. Pankratov T.A., Kachalkina A.V., Korchikov E.S., Dobrovolskaya T.G. Microbial communities of lichens // Mikrobiologiya. 2017. V. 86. No. 3. P. 265–283 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365617030156
16. Cardinale M., Grube M., Castro J.V.Jr., Mueller H. Bacterial taxa associated with the lung lichen *Lobaria pulmonaria* are differentially shaped by geography and habitat // FEMS Microbiol. Lett. 2012. V. 329. P. 111–115. doi: 10.1111/j.1574-6968.2012.02508.x
17. Backor M., Fahselt D., Wu C.T. Free proline content is positively correlated with copper tolerance of the lichen photobiont *Trebouxia erici* (Chlorophyta) // Plant Science. 2004. V. 167. P. 151–157. doi: 10.1016/j.plantsci.2004.03.012
18. Tsivileva O.M., Nikitina V.E., Garibova L.V. The influence of the composition of the culture medium on the activity of extracellular lectins *Lentinus edodes* // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2005. V. 41. No. 2. P. 200–203 (in Russian). doi: 10.1007/s10438-005-0030-8
19. Printzen C. Fungal specific primers for PCR-amplification of mitochondrial LSU in lichens // Mol. Ecol. Notes. 2002. No. 2. P. 130–132. doi: 10.1046/j.1471-8286.2002.00179.x
20. Baymiev An.Kh., Ptitsyn K.G., Blagova D.K., Muldashev A.A., Baymiev Al.Kh. Genetic diversity and phylogeny of root nodule bacteria entering into symbiosis with bitter peavine *Lathyrus vernus* (L.) Bernh. // Mikrobiologiya. 2011. V. 80. No. 1. P. 100–104 (in Russian). doi: 10.1134/S0026261711010036

Азот и азотсодержащие соединения в цианолишайниках рода *Peltigera*

© 2020. Г. Н. Табаленкова, д. б. н., доцент, в. н. с.,

О. В. Дымова, к. б. н., с. н. с.,

Т. К. Головки, д. б. н., профессор, г. н. с.,

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

В лесах таёжной зоны Республики Коми обитает около 800 видов лишайников, 13% из них являются цианолишайниками. Цианобактерии способны осуществлять процесс биологической азотфиксации, обеспечивая все компоненты лишайниковой ассоциации органическим азотом. Приведены данные о содержании азота, белковых и свободных аминокислот, пигментов в талломах 10 видов цианолишайников. Выявлена существенная межвидовая вариабельность изучаемых показателей. Содержание азота в сухой массе лишайников варьировало в пределах 20–40, белкового – от 15 до 27 мг/г. Содержание хлорофиллов изменялось от 0,24 до 1,54 мг/г. В талломах лишайников идентифицировано от 14 до 20 индивидуальных аминокислот и один амид. Вклад большинства из них в суммарный фонд свободных аминокислот был довольно низким. Выявлены видовые особенности фонда доминирующих свободных аминокислот в талломах лишайников. Содержание белковых и свободных аминокислот тесно коррелировало с фондом азота, средние величины для всей выборки равнялись 100 и 2 мг/г соответственно. Полученные результаты существенно расширяют и дополняют представления об эколого-биологических свойствах цианолишайников и роли цианобактерий в круговороте азота таёжных экосистем.

Ключевые слова: цианолишайники, азот, аминокислоты, хлорофилл, таёжная зона, Европейский Северо-Восток.

Nitrogen and nitrogen-containing compounds in cyanolichens of *Peltigera* genus

© 2020. G. N. Tabalenkova ORCID: 0000-0002-1147-2746*

O. V. Dymova ORCID: 0000-0003-2008-6350*

T. K. Golovko ORCID: 0000-0002-7993-9541*

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: tabalenkova@ib.komisc.ru

The data on the content of nitrogen, protein and free amino acids, chlorophylls and carotenoids in the thalli of 10 species of cyanolichens in the taiga zone are presented. Significant inter specific variability of the studied parameters was revealed. The content of total nitrogen in the dry mass (DW) varied from 20 (*Peltigera leucophlebia*) to 40 mg/g (*P. scarbosa*), protein nitrogen – from 15 (*P. leucophlebia*) to 27 mg/g (*P. scarbosa*) and green pigments – from 0.24 (*P. malacea*) to 1.54 mg/g (*P. rufescens*). The content of protein and free amino acids was closely correlated with the nitrogen content and averaged respectively by 100 and 2 mg/g DW. Species specificity of dominant free amino acids in lichen thalli was revealed. Glutamic acid and glutamine were dominated in the free amino acid pool of *P. canina* and *P. membranacea*, alanine and aminoadipic acid – in *P. leucophlebia* and *P. malacea*. In lichen thalli five non-proteinogenic amino acids were indentified (β -alanine, ornithine, aminoadipine, α -aminobutyric, γ -aminobutyric). Their share in the free amino acid pool ranges from 2% (*P. membranacea*) to 40% (*P. malacea*). The presence of ornithine in all lichen species indicates the functioning of the ornithine cycle, which is involved in the synthesis of the proteinogenic amino acid arginine. The obtained results significantly expand and complement the understanding of the ecological and biological features of cyanolichens and role of cyanoprocaryotes in the nitrogen cycle of taiga ecosystems.

Keywords: cyanolichens, nitrogen, amino acids, chlorophyll, taiga zone, the European Northeast.

Лишайники представляют собой своеобразную и относительно слабоизученную группу фототрофных симбиотических организмов. Лишайники являются неотъемлемым компонентом многих экосистем и существенно влияют на их функционирование. Разнообразие и распространение лишайников в значительной степени зависит от условий местообитания. Бореальные леса европейского Северо-Востока России, благодаря разнообразию типов (ельники, сосняки, осинники и др.), микроклимату, наличию разнообразных субстратов, благоприятны для жизни лишайников. В лесах таёжной зоны Республики Коми обитает около 800 видов лишайников и только примерно 13% из них являются цианолишайниками, т. е. содержат цианобактерии (ЦБ) [1, 2].

Помимо ассимиляции углерода, ЦБ способны осуществлять процесс биологической азотфиксации, обеспечивая тем самым все компоненты лишайниковой ассоциации органическим азотом [3]. В результате прямой фиксации N_2 из атмосферы цианолишайники вносят заметный вклад в азотный цикл экосистем, в некоторых случаях он может достигать 20 кг N/га год [4]. Азотфиксация является энергетически зависимым процессом, для превращения одной молекулы N_2 в две молекулы NH_3 необходимо 8 электронов и 16 Mg-зависимых АТФ. Ионы аммония токсичны и быстро превращаются в другие азотсодержащие продукты (например, глутамин), которые могут накапливаться, не проявляя токсичности, или используются в процессах аминирования α -кетокислот и трансаминирования. Результаты сравнительного анализа цианобионтных лишайников с хлоролишайниками, содержащими зелёную водоросль, свидетельствуют о влиянии типа фотобионта на их функциональные свойства [5, 6]. Считается, что адаптация к различным условиям обитания происходит легче у видов (*Peltigera rufescens*), содержащих в качестве фотобионта ЦБ, поскольку они способны усваивать атмосферный азот [7] и содержат фикобилины, характеризующиеся широким спектром поглощения.

В настоящей работе представлены данные о накоплении азотсодержащих соединений в талломах цианолишайников рода *Peltigera*, обитающих в таёжной зоне Республики Коми.

Объекты и методы исследований

Исследования проводили в летний период 2015–2018 гг. Талломы 10 видов довольно

распространённых цианолишайников рода *Peltigera* (табл. 1) были собраны в лесных сообществах Сыктывдинского и Княжпогостского районов Республики Коми (подзона средней тайги). Цианобактерии исследованных лишайников представлены видами рода *Nostoc*. У двух видов (*Peltigera aphotosa* и *P. leucophlebia*), кроме ЦБ, присутствует также зелёная водоросль. Для характеристики азотного статуса талломов определяли содержание общего ($N_{\text{общий}}$) и белкового азота ($N_{\text{белковый}}$), белковых и свободных аминокислот, а также концентрацию фотосинтетических пигментов.

Содержание азота определяли в сухих, измельчённых пробах на элементном CHNS-O анализаторе (EA-1110 Италия). Белковые аминокислоты (БАК) определяли на аминокислотном анализаторе (AAA T-339) после гидролиза навески в 6 н HCl при 105 °C в течение 24 ч. Белковый азот рассчитывали, исходя из массовой доли азота белковых аминокислот в общем азоте. Содержание и качественный состав свободных аминокислот (САК) определяли в лиофильно высушенном материале после извлечения их 40%-ным этанолом на анализаторе AAA-400 (Чехия) в системе литиевых буферов.

Пигменты экстрагировали смесью диметилсульфоксид : ацетон в отношении 2 : 1 из высечек талломов (200–250 мг сырой массы) и определяли спектрофотометрически на приборе UV-1700 («Shimadzu», Япония). Для достижения максимального извлечения пигментов из талломов предварительно была проведена экспериментальная работа по подбору способа экстракции и растворителя [8].

Для проведения всех анализов использовали образцы в трёхкратной биологической и 2–3-кратной аналитической повторности. Данные рассчитывали на единицу сухой массы и обрабатывали статистически.

Результаты и обсуждение

Содержание хлорофиллов варьировало в широких пределах – от 0,24 мг/г (*P. malacea*) до 1,54 мг/г (*P. rufescens*) (табл. 1). Средняя величина составляла 0,7 мг/г и была заметно выше медианного значения (0,5), что согласуется с данными других авторов [9]. Следует отметить сравнительно высокое накопление (больше 1 мг/г) фотосинтетических пигментов в талломах трёхбионтных лишайников *P. aphotosa* и *P. leucophlebia*. Изученные нами виды цианолишайников превосходили одноименные виды сем. Peltigeraceae, произрас-

тающие на Западном Шпицбергене, по накоплению хлорофиллов (0,30–0,78 мг/г) [10].

Исследованные виды отличались по содержанию общего азота. Его содержание в талломах варьировало от 22 (*P. leucophlebia*) до 40 мг/г (*P. scarbosa*). Средняя величина составляла 33 мг/г и мало отличалась от медианного значения. Содержание азота в талломах *P. aphotosa* и *P. leucophlebia* – видов, содержащих помимо ЦБ и зелёную водоросль, была на 30% ниже, чем у других исследованных лишайников. Основная часть азота (свыше 60%) лишайникового симбиоза входит в белковую фракцию, преимущественно грибного компонента, биомасса которого почти на порядок превышает биомассу фотобионта. Концентрация белкового азота варьировала от 15 (*P. leucophlebia*) до 27 мг/г (*P. scarbosa*). Содержание белкового азота тесно коррелировало с содержанием общего азота ($r = 0,97$).

Как известно, азот входит в состав хлорофилла (6,27% молекулярной массы хлорофилла). Однако мы не выявили какой-либо связи между содержанием хлорофилла и общего азота. Возможно, это является следствием того, что доля фотобионта в биомассе лишайников менее 10%, а значительная часть азота заключена в хитине – полисахариде клеточной стенки грибного мицелия.

Аминокислоты выполняют в живых организмах разнообразные функции, входят в состав растворимых, структурных и запасных белков, присутствуют в виде свободной фракции. Наибольшим содержанием белковых аминокислот (190–200 мг/г) характеризовались талломы *P. scarbosa* и *P. membranacea*

(табл. 1), наименьшим – талломы *P. aphotosa* и *P. leucophlebia*.

При анализе белков было обнаружено 17 различных аминокислот, из них цистин и метионин – в следовых количествах. Основная часть белковых аминокислот (60%) была представлена моно- и дикарбоновыми кислотами.

К основным исходным веществам, обеспечивающим синтез белков, относятся свободные аминокислоты, они являются одними из самых активных участников метаболизма. Анализ свободных аминокислот в образцах четырёх видов лишайников выявил, что их концентрация была довольно низкой (табл. 2). По суммарному содержанию свободных аминокислот исследованные виды располагались в следующем порядке: *P. membranacea* > *P. canina* > *P. malacea* > *P. leucophlebia*.

В талломах лишайников было идентифицировано от 14 до 20 индивидуальных аминокислот и один амид. Вклад большинства из них в суммарный фонд свободных аминокислот был довольно низким, доминировали 3–4. В талломах *P. canina* и *P. membranacea* доминируют глутаминовая кислота и глутамин, у *P. leucophlebia* и *P. malacea* – аланин и аминокислоты.

В талломах лишайников обнаружено пять непотеиногенных кислот (β -аланин, орнитин, аминокислоты, α -аминомасляная, γ -аминомасляная). Их доля в общем пуле свободных аминокислот составляет от 2 (*P. membranacea*) до 40% (*P. malacea*). Присутствие у всех исследованных лишайников орнитина свидетельствует о функционировании в талломах орнитинового цикла, участвующего в синтезе протеиногенной аминокислоты аргинина.

Таблица 1 / Table 1

Содержание азота, белковых аминокислот и хлорофиллов в талломах лишайников рода *Peltigera*, мг/г сухой массы / Content of the nitrogen, protein amino acids and chlorophylls in the cyanolichens of *Peltigera* genus, mg/g DW

Виды лишайников Lichen species	Азот / Nitrogen		Белковые аминокислоты Protein amino acids	Хлорофиллы Chlorophylls
	N _{общий} N _{total}	N _{белковый} N _{protein}		
<i>P. malacea</i>	27,1±1,8	19,2	141,3	0,24±0,05
<i>P. membranacea</i>	36,1±2,4	25,0	191,2	0,44±0,06
<i>P. canina</i>	35,3±2,4	24,1	181,8	0,42±0,03
<i>P. neopolydactyla</i>	35,2±2,4	21,6	158,6	0,42±0,08
<i>P. praetextata</i>	35,2±2,4	24,2	181,7	0,33±0,03
<i>P. rufescens</i>	31,2±2,1	18,6	140,2	1,54±0,06
<i>P. scarbosa</i>	39,6±2,6	26,8	202,1	0,66±0,21
<i>P. ponojensis</i>	39,0±2,6	24,6	184,4	0,62±0,14
<i>P. aphotosa</i>	24,0±4,0	16,1	121,9	1,30±0,12
<i>P. leucophlebia</i>	22,0±4,0	14,9	111,8	1,14±0,15

Таблица 2 / Table 2

Содержание основных свободных аминокислот в талломах цианолишайников рода *Peltigera*, % от суммы свободных аминокислот / Content of the individual free amino acids in the cyanolichens of *Peltigera* genus, % of total content

Аминокислоты Amino acids	Виды лишайников / Lichen species			
	<i>P. malacea</i>	<i>P. canina</i>	<i>P. membranacea</i>	<i>P. leucophlebia</i>
Аспарагиновая / Aspartic	3,9	–	0,5	1,6
Глютаминовая / Glutamic	–	64,0	66,2	–
Глутамин / Glutamine	–	24,0	26,8	–
Аминоадипиновая / Amino adipic	22,3	–	–	6,4
Пролин / Proline	0,7	–	–	6,4
Глицин / Glicine	1,0	–	–	2,3
Аланин / Alanine	36,1	–	–	54,5
Валин / Valine	0,8	0,4	0,3	2,0
Лейцин / Leucine	1,2	0,6	0,3	1,4
Тирозин / Tyrozine	1,3	1,0	0,6	1,4
Фенилаланин / Phenylalanine	0,2	0,3	0,3	0,7
β-аланин / β-alanine	4,4	–	–	–
γ-аминомасляная / γ-aminobutyric	0,3	0,4	0,2	0,8
Орнитин / Ornithine	13,5	1,8	1,7	14,7
Лизин / Lysine	1,7	0,8	0,4	2,7
Аргинин / Arginine	9,7	4,9	1,9	2,8
Сумма свободных аминокислот, мг/г сухой массы / Total content of free amino acids, mg/g DW	1,47	3,24	4,83	0,75

Примечание: В таблице представлены свободные аминокислоты, содержание которых составляет не менее 0,2% суммы всех аминокислот; прочерк означает присутствие аминокислоты в следовых количествах.

Note: The table shows the free amino acids, the content of which is at least 0.2% of the sum of all amino acids; a dash indicates the presence of an amino acid in trace amounts.

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают значительную видовую вариабельность содержания хлорофиллов, различных форм азота и аминокислот в талломах лишайников рода *Peltigera*. Установлено, что содержание белковых и свободных аминокислот тесно коррелирует с концентрацией общего азота в талломах, тогда как корреляция между суммой белковых и суммой свободных аминокислот статистически незначима. В целом, полученные результаты существенно углубляют и расширяют представление об эколого-биологических особенностях цианолишайников и роли цианобактерий в круговороте азота таёжных экосистем.

Работа выполнена в рамках темы НИОКТР «Физиология и стресс-устойчивость фотосинтеза растений и пойкилогидрических фотоавтотрофов в условиях Севера» (№ АААА-А17-117033010038-7), частично поддержана грантом проектов УрО РАН (15-12-4-4 и 18-4-4-20).

Литература

1. Пыстина Т.Н. Лишайники таёжных лесов Европейского Северо-Востока: подзоны южной и средней тайги. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 239 с.
2. Пыстина Т.Н., Романов Г.Г. Видовое разнообразие цианобионтных лишайников и их азотфиксирующая активность на территории Республики Коми // Ботанический журнал. 2010. Т. 95. № 2. С. 177–182.
3. Lange O. L., Leisner J.M.R., Bilger W. Chlorophyll fluorescence characteristics of the cyanobacterial lichen *Peltigera rufescens* under field conditions. II. Diel and annual distribution of metabolic activity and possible mechanisms to avoid photoinhibition // Flora. 1999. V. 194. P. 413–430.
4. Nash III T.H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling // Lichen biology / Ed. T.N. Nash III. Cambridge: Camb. Univ. Press, 2008. P. 234–251.
5. Головки Т.К., Дымова О.В., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н. Фотосинтетические пигменты и азот в талломах лишайников бореальной флоры // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 38–44.
6. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Захойский И.Г. Аминокислотный состав биомассы некоторых видов лишайников таёжной зоны на Европейском Северо-Востоке России // Известия Самарского научного

центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 2 (3). С. 556–560.

7. Rai A.N. Nitrogen metabolism // Handbook of Lichenology / Ed. M. Galun. Boca Raton: CRS Press, 1988. P. 201–237.

8. Дымова О.В., Кузиванова О.А. Оптимизация способа экстракции фотосинтетических пигментов и их содержания в талломах лишайников // Химия растительного сырья. 2018. № 2. С. 137–144.

9. Palmqvist K., Dahlman L., Valladares F., Thehler A., Sancho L.S., Mattsson J.-E. CO₂ exchange and tallus nitrogen across 75 contrasting lichen associations from different climate zones // Oecologia. 2002. V. 133. P. 295–306.

10. Марковская Е.Ф., Шмакова Н.Ю. Растения и лишайники Западного Шпицбергена: экология, физиология. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2017. 270 с.

References

1. Pystina T.N. Lichens of the taiga forests of the European Northeast: subzones of the southern and middle taiga. Ekaterinburg: URO RAN, 2003. 239 p. (in Russian).

2. Pystina T.N., Romanov G.G. Species diversity of cyanobiontic lichens and their nitrogen-fixing activity in the Komi Republic // Botanicheskiy zhurnal. 2010. V. 95. No. 2. P. 177–182 (in Russian).

3. Lange O.L., Leisner J.M.R., Bilger W. Chlorophyll fluorescence characteristics of the cyanobacterial lichen *Peltigera rufescens* under field conditions. II. Diel and annual distribution of metabolic activity and pos-

sible mechanisms to avoid photoinhibition // Flora. 1999. V. 194. P. 413–430.

4. Nash III T.H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling // Lichen biology / Ed. T.N. Nash III. Cambridge: Camb. Univ. Press, 2008. P. 234–251.

5. Golovko T.K., Dymova O.V., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. Photosynthetic pigments in the thalli of lichens of boreal flora // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2015-4-038-044

6. Tabalenkova G.N., Dal'ke I.V., Zahozhiy I.G. Amino acids composition of some lichen species in taiga zone of European North-East of Russia // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2017. V. 19. No. 2 (3). P. 556–560 (in Russian).

7. Rai A.N. Nitrogen metabolism // Handbook of Lichenology / Ed. M. Galun. Boca Raton: CRS Press, 1988. P. 201–237.

8. Dymova O.V., Kuzivanova O.A. The optimization of extraction routine of photosynthetic pigments and its content in lichens thalli // Himiya rastitelnogo syrya. 2018. No. 2. P. 137–144. doi: 10.14258/jepm.2018023013 (in Russian).

9. Palmqvist K., Dahlman L., Valladares F., Thehler A., Sancho L.S., Mattsson J.-E. CO₂ exchange and tallus nitrogen across 75 contrasting lichen associations from different climate zones // Oecologia. 2002. V. 133. P. 295–306. doi: 10.1007/s00442-002-1019-0

10. Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. Plants and lichens of West Spitsbergen: ecology, physiology. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2017. 270 p. (in Russian).

**Изучение особенностей химического состава
водных объектов заповедной территории
для использования в качестве регионального фона**

© 2020. Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
С. Г. Скугорева^{1,2}, к. б. н., н. с., доцент,
Е. В. Товстик¹, к. б. н., с. н. с., доцент,

Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

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

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

В силу удалённости от прямых источников антропогенного загрязнения особо охраняемые природные территории (ООПТ) могут быть использованы в качестве фоновых. С целью определения «эталона» для оценки состояния поверхностных водных объектов Кировской области проведено исследование состояния поверхностных вод государственного природного заказника (ГПЗ) «Пижемский». Исследованы пробы воды из рек Пижма, Ярань, а также пойменных водоёмов, расположенных в пределах ООПТ. Установлено, что вода исследованных водных объектов относится к категории гидрокарбонатных кальциевых вод. В целом поверхностные водные объекты территории ГПЗ «Пижемский» характеризуются относительно низким содержанием неорганических ионов и являются слабо минерализованными. Для некоторых водных объектов установлено повышенное содержание ионов аммония, цинка и меди. Оно превышает ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения, но не выходит за пределы ПДК для вод хозяйственно-питьевого значения. Повышенное содержание данных ионов в воде может быть связано с природными процессами (выщелачивание горных пород, эвтрофикация, разложение органических веществ и др.). Вода из р. Ярань в пределах ГПЗ «Пижемский» характеризуется более высокой минерализацией, чем воды р. Пижма и пойменных водоёмов, прилегающих к ней. Полученные в ходе исследования данные хорошо согласуются с показателями по ионному составу озёр государственного природного заказника «Нургуш», который является фоновой территорией экологического мониторинга региона. Особенностью водных объектов ГПЗ «Пижемский» является более высокая минерализация воды, что обусловлено повышенным содержанием в ней гидрокарбонат-ионов. По результатам проведённой работы поверхностные водные объекты заказника «Пижемский» рекомендованы в качестве фоновых для объектов с гидрокарбонатно-кальциевым типом вод.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, поверхностные водные объекты, ионный состав, тяжёлые металлы.

**Study of the chemical composition of water bodies
protected area for use as a regional background**

© 2020. T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X¹

S. G. Skugoreva^{1,2} ORCID: 0000-0002-5902-5187²

E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076³

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047⁴

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktывkar, Komi Republic, Russia, 167982,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Specially protected natural areas (SPNA), due to their remoteness from direct sources of anthropogenic pollution, can be used as background territories. In order to determine the “standard” for assessing the state of surface water bodies of the Kirov region, a study was made of the state of surface waters of the Pizhemy State Nature Reserve (SNR). Water samples from the Pizhma and Yaran rivers, as well as floodplain reservoirs located within the protected areas were studied. It is established that the water of the studied water bodies belongs to the category of calcium carbonate waters.

In general, surface water bodies of the territory of the Pizhemy SNR are characterized by a relatively low content of inorganic ions and are poorly mineralized. For some water bodies, an increased content of ammonium, zinc and copper ions has been established. It exceeds the maximum permissible concentration for fishery waters, but does not exceed the maximum permissible concentration for drinking water. The increased content of these ions in water can be associated with natural processes (leaching of rocks, eutrophication, decomposition of organic substances, etc.). Water from the Yaran river within the Pizhemy SNR is characterized by a higher salinity than the waters of the Pizhma river and floodplain ponds adjacent to it. The data obtained during the study are in good agreement with the indicators obtained earlier on the ionic composition of the lakes of the Nurgush SNR, which is the background territory for the region's environmental monitoring. A feature of water bodies at the Pizhemy SNR is a higher salinity of water, which is due to the increased content of bicarbonate ions in it. According to the results of the work, surface water bodies of the Pizhemy nature reserve are recommended as background for objects with calcium-carbonate type of water.

Keywords: specially protected natural territories, surface water bodies, ionic composition, heavy metals.

Мониторинг состояния поверхностных вод в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) приобретает всё большую значимость в связи интенсивным использованием природной среды и возрастающим антропогенным загрязнением [1, 2]. Располагаясь вдали от прямых источников загрязнения, ООПТ в исключительных случаях могут быть подвержены загрязнению вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ и их миграции [3–5]. В связи с этим современное состояние водных объектов в пределах ООПТ можно использовать как «условно фоновое», а сами объекты – рассматривать в качестве «эталонов» при оценке состояния водных объектов сопредельных территорий [6].

При исследовании состояния водных объектов ООПТ используют такие показатели, как температура, электропроводность воды, содержание растворённого кислорода, органических и биогенных веществ, учитывают их сезонные колебания [7, 8]. Содержание ионов металлов в поверхностных водах сравнивают не только с ПДК, но и с их кларками в литосфере [9]. Учитывают, что значительный вклад в формирование химического состава поверхностных вод ООПТ вносят, как правило, природные процессы [10, 11]. К ним относятся выщелачивание и растворение минералов, химическое выветривание горных пород, гидрологические факторы и биологические процессы, происходящие в водной среде. Данные процессы могут быть следствием повышения содержания в поверхностных водах ионов марганца, железа, свинца, аммония и др. [7, 12]. На отдельных территориях существенную роль в изменении качества поверхностных вод играет суммарное испарение воды в жаркие периоды года, а также процессы, происходящее вследствие глобального потепления климата [13].

Целью работы является оценить возможность использования поверхностных водных объектов государственного природного заказ-

ника «Пижемский» в качестве регионального фона по данным химического анализа воды.

Объекты и методы исследования

В форме природоохранного учреждения ГПЗ «Пижемский» функционирует с 2002 г. Он расположен на территории пяти районов Кировской области – Котельничского, Тужинского, Пижанского, Арбажского и Советского. Территория заказника имеет вытянутую форму с северо-запада на юго-восток вдоль р. Пижда вниз по течению с поворотом на юго-восток по р. Немда, впадающей в р. Пижда. Протяжённость заказника по руслу р. Немда составляет 42 км, по руслу р. Пижда – 202 км [14]. Заказник «Пижемский» имеет особо ценное значение для поддержания целостности, охраны и восстановления водных биоценозов, сохранения в естественном состоянии уникальных природных объектов: скального массива «Камень», Чимбулатского и Берсвятского ботанико-геологических комплексов, Зараменской пещеры и др. [15, 16]. К наиболее крупным водным объектам территории ГПЗ «Пижемский» относятся реки Пижда, Немда, Ярань, озеро Чёрное.

Ранее нами проведены исследования и описаны [17] химический состав и состояние почвенного покрова, а также растительности на территории ГПЗ «Пижемский». Исследования выполнены, в том числе, с применением методов дистанционного зондирования Земли. Комплексного исследования водных объектов заказника «Пижемский» не проводилось. В данной работе представлены результаты химического состава поверхностных водных объектов, сделана сравнительная оценка их состояния.

Отбор проб воды на территории ГПЗ «Пижемский» проводили в июле 2017 г. преимущественно по течению реки Пижда. Пробы воды были отобраны из р. Пижда вблизи с. Вынур (точки №№ 1, 2 и 3 на рисунке); в устье

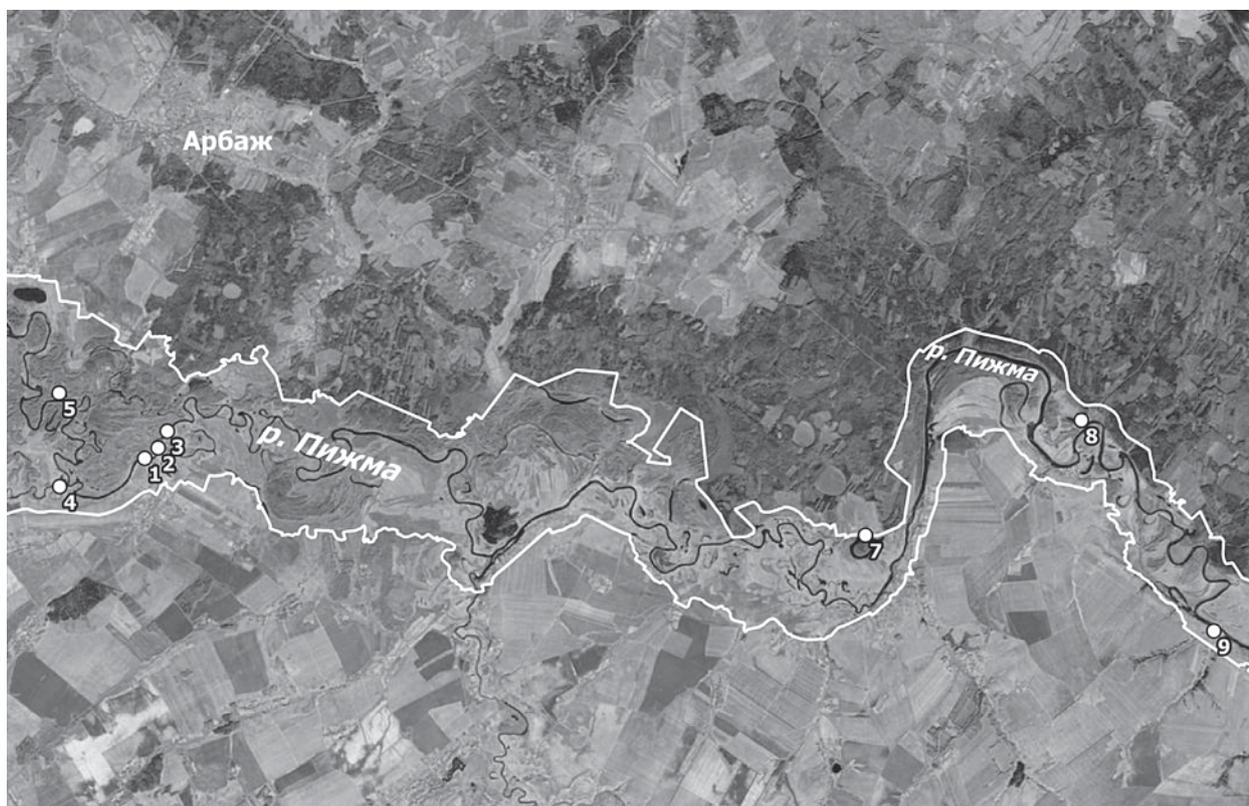


Рис. Карта-схема точек отбора проб воды из поверхностных водных объектов ГПЗ «Пижемский». Изображение со спутника Sentinel 2. Разрешение 10 м

Fig. Schematic map of water sampling points from surface water bodies of the Pizhmsky State Nature Reserve. Sentinel 2 satellite image. Resolution of 10 m

р. Ярань (№ 4); из водоёма вблизи д. Коктыш (№ 5); из оз. Чёрное (№ 7); из водоёма вблизи д. Борок (№ 8); из р. Пижма вблизи д. Лесниково (№ 9). Пробы воды отбирали с глубины 0,3 м с помощью стеклянного батометра в пластиковые бутылки объёмом 1,5 л по ГОСТ 31861-2012.

Анализ проб воды проводили в научно-исследовательской экоаналитической лаборатории Вятского государственного университета. Удельную электропроводность измеряли на кондуктометре Cond 340i, водородный показатель – на рН-метре МИ-150 потенциометрическим методом согласно РД 52.24.495-2005. Массовую концентрацию неорганических ионов (натрия, аммония, калия, магния, кальция, фторидов, хлоридов, нитратов, фосфатов и сульфатов) определяли методом ионной хроматографии на жидкостном хроматографе «Стайер» по ФР.1.31.2005.01724 и ФР.1.31.2005.01738. При определении концентрации гидрокарбонатов хроматографическим методом в качестве элюента использовали 10 мМ раствор гидроксида натрия. Содержание нитрит-ионов в пробах воды определяли фотометрическим методом с реактивом Грисса по ПНД Ф 14.1:2:4.3-95. Опреде-

ление содержания тяжёлых металлов (ТМ) в исследуемых пробах воды проводили методом инверсионной вольтамперометрии согласно ФР.1.31.2011.10126. Полученные в ходе химического анализа концентрации ионов сравнивали с ПДК для водных объектов рыбохозяйственного (ПДК_{р.х.}) [18] и хозяйственно-питьевого значения (ПДК_{х.п.}) (ГН 2.1.5.1315-03).

Результаты и обсуждение

Для водных объектов ГПЗ «Пижемский» характерны низкие значения электропроводности воды (168–342 мкСм/см), что свидетельствует об относительно невысоких концентрациях ионов (табл. 1) и низком уровне минерализации проб. Значения водородного показателя в исследованных водных объектах отличаются незначительно и не выходят за пределы норматива.

В ходе хроматографического анализа установлено, что содержание ионов натрия в исследуемых пробах воды составило 4,5–6,8 мг/л. Ионы калия содержались в меньших количествах, чем ионы натрия (в 4–5 раз). Содержание ионов кальция в исследуемых

Таблица 1 / Table 1

Ионный состав проб воды поверхностных водных объектов ГПЗ «Пижемский»
The ionic composition of water samples of the Pizhemy State Nature Reserve

Водный объект Water body	№ точки No. of selec- tion	pH	Содержание ионов, мг/л / The content of ions, mg/L											
			Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻	
Река Пижда вблизи с. Вынур The Pizhma river near village of Vynur	1	210±11	7,9±0,1	5,6±0,8	1,41±0,21	3,1±0,6	7,5±0,7	41±4	0,057*	2,15±0,22	1,01±0,15	3,67±0,37	0,40±0,06	153±18
	2	242±12	7,9±0,1	5,9±0,9	1,56±0,23	0,74±0,26	7,2±0,7	47±5	0,021*	2,90±0,29	0,073±0,011	4,0±0,4	0,153*	160±19
Устье р. Ярань Mouth of the Yaran river	3	248±12	7,9±0,1	6,1±0,9	1,62±0,24	0,67±0,23	7,4±0,7	48±5	0,067*	3,53±0,35	1,79±0,27	4,4±0,4	0,189*	160±19
	4	342±17	8,1±0,1	9,0±1,3	2,28±0,34	0,48±0,17	10,6±1,1	64±6	0,125±0,019	4,7±0,5	2,8±0,4	11,0±1,1	0,63±0,09	206±25
Водоём вблизи д. Коктыш Pond near village of Koktysh	5	187±19	7,9±0,1	5,2±0,8	1,3±0,19	1,31±0,28	6,8±0,7	35,7±3,6	0,023*	1,64±0,16	0,97±0,15	2,80±0,28	0,103*	137±17
	7	189±19	7,9±0,1	5,4±0,8	1,23±0,18	0,76±0,27	6,4±0,6	35,1±3,5	0,026*	2,49±0,25	0,48±0,07	5,9±0,6	0,134*	137±17
Водоём вблизи д. Борок Reservoir near village of Borok	8	168±17	7,8±0,1	4,5±0,7	1,27±0,19	0,68±0,24	5,8±0,6	31,5±3,1	0,031*	1,95±0,20	0,062±0,009	4,2±0,4	0,128*	122±15
	9	252±13	8,0±0,1	6,8±1,0	1,59±0,24	1,14±0,24	8,5±0,9	47±5	0,085*	2,75±0,28	1,47±0,22	5,1±0,5	0,132*	168±20
ПДК _{п.х.} / MPC _f	-	6,5-8,5	50	120	50	0,50	40	180	0,75	300	40	100	-	-
ПДК _{х.п.} / MPC _d	-	-	-	200	-	1,93	50	-	1,5	350	45	500	3,5	-

Примечание: N – электропроводность, мкСм/см, * – ниже предела обнаружения метода, поэтому невозможно рассчитать погрешность измерения, прочерк обозначает, что норматив не установлен, ПДК_{п.х.} и ПДК_{х.п.} – ПДК для водных объектов рыбохозяйственного [17] и хозяйственно-питьевого значения (ГН 2.1.5.1315-03).

Note: N – electrical conductivity, µS/cm, * – below the detection limit of the method, therefore it is impossible to calculate the measurement error, a dash indicates that the standard is not set, MPC_f and MPC_d – MPC for water bodies of fishery [17] and drinking water value (GN 2.1.5.1315-03).

пробах варьировало от 31,5 до 64 мг/л. Концентрация ионов магния в водах исследованных водных объектов ниже содержания ионов кальция. По содержанию ионов кальция и магния не зафиксировано превышения ПДК ни для одной из исследованных проб.

По содержанию ионов аммония во всех исследованных пробах воды установлено превышение значений ПДК_{р.х.} (0,5 мг/л). Максимальное значение концентрации ионов аммония в воде (3,1 мг/л) было выявлено в р. Пижма вблизи села Вынур (точка № 1), её значение выше ПДК в 6,2 раза. Превышение ПДК по содержанию ионов аммония в пробах воды из водоёма вблизи д. Коктыш и из р. Пижма вблизи д. Лесниково (точки №№ 5 и 9) составило 2,6 и 2,3 раза соответственно. Причиной повышенного содержания ионов аммония в воде могут быть процессы разложения азотсодержащих органических веществ природного происхождения.

Кроме содержания катионов, в пробах воды определяли концентрации анионов (фторидов, нитратов, хлоридов, сульфатов, фосфатов и гидрокарбонатов). По результатам исследования относительно невысокие концентрации, значительно ниже ПДК, были отмечены для всех определяемых анионов.

Содержание сульфатов в пробах воды варьировало от 2,8 до 11, хлоридов – от 1,64 до 4,7, нитратов от 0,06 до 2,80, фторидов от 0,025 до 0,125 мг/л. При этом следует отметить, что концентрации нитрит-, фосфат- и фторид-ионов были ниже предела обнаружения используемого метода для большинства исследованных проб воды.

Гидрокарбонаты и карбонаты являются важнейшей частью природных вод. Известно, что в слабощелочных водах преобладают гидрокарбонат-ионы. Содержание гидрокарбонатов в пробах воды исследованных водных объектов варьировало от 122 до 206 мг/л.

В целом, анализ полученных данных (табл. 1) по химическому составу воды в исследованных водных объектах ГПЗ «Пижемский» позволяет сделать вывод о том, что вода, отобранная в устье р. Ярань (точка № 4), по большинству химических показателей отличается от вод других водных объектов. Эти данные хорошо коррелируют со значениями электропроводности воды. Для воды из устья р. Ярань установлено максимальное значение электропроводности (342 мкСм/см). Объяснением этому может быть и то, что вода р. Ярань характеризуется большей минерализацией по сравнению с р. Пижмой.

По результатам изучения химического состава воды водных объектов ГПЗ «Пижемский» составлен ряд распределения ионов (по снижению их содержания). Для катионов он выглядит таким образом: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$, а для анионов так: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > PO_4^{3-} > F^-$. Данные закономерности являются типичными для пресных вод [19]. Таким образом, в воде всех поверхностных водных объектов ГПЗ «Пижемский» из анионов преобладают гидрокарбонат-ионы, из катионов – ионы кальция, т. е. исследуемые воды относятся к категории гидрокарбонатных кальциевых вод [20]. Воды этого типа мало минерализованы и характеризуются избытком гидрокарбонат-ионов, которые образуются в процессе химического выщелачивания пород.

Результаты данного исследования в целом хорошо согласуются с показателями по ионному составу озёр ГПЗ «Нургуш», полученными ранее [7]. Однако, водные объекты ГПЗ «Пижемский» характеризуются более высоким содержанием гидрокарбонат-ионов и ионов кальция, которых в 1,5–3,4 раза больше, чем в государственного природного заповедника «Нургуш». Различия в содержании данных ионов можно объяснить природными условиями формирования водных объектов ГПЗ «Пижемский», в частности, с выходами на поверхность пермских рифовых известняков на территории его расположения [17].

Кроме ионного состава воды в поверхностных водных объектах ГПЗ «Пижемский» определяли содержание загрязняющих веществ на примере ТМ (медь, свинец, кадмий, марганец и цинк). Результаты проведённых исследований проб воды по содержанию ТМ представлены в таблице 2.

Анализ данных (табл. 2) свидетельствует о том, что большей части исследованных водных объектов характерно повышенное относительно ПДК_{р.х.} содержание цинка. Особенно высокие его концентрации, превышающие значения ПДК_{р.х.}, обнаружены в пробах воды из оз. Чёрное, в устье р. Ярань и р. Пижмы (точка № 3). В 1,5–2 раза ниже было содержание цинка в пробах воды, отобранных в р. Пижма после впадения р. Вынурка (точка № 2) и водоёма вблизи д. Борок. Вблизи берега р. Пижма содержание этого элемента значительно меньше, чем в средней части течения реки.

Практически для всех водных объектов (за исключением водоёма вблизи д. Коктыш, р. Ярань и р. Пижма вблизи д. Лесниково) характерно повышенное содержание меди, превышающее значения ПДК_{р.х.} до 30 раз. Значи-

Таблица 2 / Table 2

Содержание тяжёлых металлов в пробах воды ГПЗ «Пижемский», мкг/л
The content of heavy metals in water samples at the Pizhemy gas processing plant, µg/L

Водный объект Water body	№ точки отбора No. of selection point	Zn	Cd	Pb	Cu	Mn
Река Пижда вблизи с. Вынур The Pizhma river near village of Vynur	1	5,4±2,6	0,29±0,13	2,5±1,3	11,3±2,6	3,4±1,1
	2	15±4	0,018±0,009	1,2±0,6	4,5±1,9	1,1±0,4
	3	36±10	0,17±0,07	1,0±0,5	6,2±2,6	4,1±1,3
Устье р. Ярань Mouth of the Yaran river	4	36±10	0,43±0,19	3,7±1,9	1,1±0,5	1,6±0,5
Водоём вблизи д. Коктыш Pond near village of Koktysh	5	2,7±1,3	0,016±0,007	0,50±0,24	0,08±0,03	1,8±0,6
Оз. Чёрное Lake Chernoe	7	44±12	1,8±0,4	0,8±0,4	8,4±3,5	2,1±0,7
Водоём вблизи д. Борок Reservoir near village of Borok	8	19±5	0,017±0,008	2,5±1,3	30±7	2,6±0,8
Река Пижда вблизи д. Лесниково The Pizhma river near village of Lesnikovo	9	14±4	0,017±0,008	0,17±0,09	0,18±0,07	1,9±0,6
ПДК _{р.х.} / MPC _f		10	5	6	1	10
ПДК _{х.п.} / MPC _d		1000	1	10	1000	100

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК_{р.х.} [17].
Note: values exceeding the MPC_f are marked in bold [17].

тельно более высоким было содержание соединений меди в водоёме вблизи деревни Борок (точка № 9) – 30, в воде р. Пижда вблизи с. Вынур (точка № 1) – 11,3 и в оз. Чёрное (точка № 7) – 8,4 мкг/л. Также отмечено повышенное значение концентрации соединений этого металла в верхнем течении р. Пижда (точки №№ 2, 3). В этих пробах концентрация меди превышает ПДК_{р.х.}, но не выходит за пределы ПДК_{х.п.}. В остальных исследованных пробах воды содержание меди незначительное (табл. 2).

Высокие значения концентрации меди и цинка в воде данных водных объектов могут быть связаны с выщелачиванием их при выветривании коренных пород, а также с процессами эвтрофикации водных объектов [21]. Концентрация марганца, свинца, кадмия во всех исследованных пробах воды значительно ниже ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения. Такое распределение концентрации ТМ может быть обусловлено наличием протоков между водоёмами и реками, а также сезонным повышением уровня воды в заказнике.

Заключение

По результатам анализа выявлено, что для всех исследованных водных объектов в преде-

лах ГПЗ «Пижемский» характерен порядок распределения ионов, типичный для пресных вод поверхностных водных объектов. Вода из р. Пижда и водоёмов в её пойме мало минерализована и её можно отнести к категории гидрокарбонатных кальциевых вод.

Вода, отобранная в устье р. Ярань, отличается от воды других водных объектов ГПЗ «Пижемский» более высокими значениями показателей химического состава. Это может быть связано с большей степенью минерализации воды из р. Ярань, являющейся притоком р. Пижда. Эти результаты хорошо коррелируют и со значениями электропроводности воды в данном водном объекте.

Для большинства водных объектов на территории ГПЗ «Пижемский» отмечено повышенное содержание ионов аммония, цинка и меди. Выявленные значения данных показателей превышают нормативы для водных объектов рыбохозяйственного, но не выходят за пределы ПДК для объектов хозяйственно-питьевого значения.

Химический состав воды поверхностных водных объектов ГПЗ «Пижемский» в основном сходен с ионным составом водных объектов ООПТ ГПЗ «Нургуш», который является фоновой территорией экологического мониторинга региона. Отличительной особенностью

водных объектов заказника «Пижемский» является повышенное, по сравнению с заповедником «Нургуш», содержание гидрокарбонатов и ионов кальция, что может быть обусловлено выходами на поверхность пермских рифовых известняков.

Таким образом, показатели химического состава воды поверхностных водных объектов государственного природного заказника «Пижемский» можно рекомендовать при проведении мониторинга в качестве фоновых показателей для объектов с гидрокарбонатно-кальциевым типом вод.

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

Литература

1. Borodina E.V., Borodina U.O. Water chemistry formation in lakes of specially protected natural areas in the Altay Mountains: case study of the Mul'ta River // *Water Resources*. 2019. V. 46. No. 4. P. 582–594.
2. Лукьянова Н.В., Мясков А.В. Влияние горной промышленности на особо охраняемые природные территории // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 6. С. 223–330.
3. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A. Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and Western Siberia // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. No. 6. P. 065010.
4. Bucher K., Zhou W., Stober I. Rocks control the chemical composition of surface water from the high Alpine Zermatt area (Swiss Alps) // *Swiss Journal of Geosciences*. 2017. V. 110. P. 811–831.
5. Tomilina I.I., Gremyachikh V.A., Grebenyuk L.P. Ecotoxicological monitoring in lakes of Northwestern and Central European Russia situated in specially protected natural areas // *Water Resour.* 2014. V. 41. P. 312–318.
6. Adamenko Ya.S., Arkhypova L.M., Mandryk O.M. Territorial normative of quality of hydroecosystems of protected territories // *Hydrobiological Journal*. 2017. V. 53. No. 2. P. 50–58.
7. Адамович Т.А., Скугорева С.Г., Князева Е.В., Ашихмина Т.Я. Изучение ионного состава воды озёр Государственного природного заповедника «Нургуш» // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 4 (72). С. 3–12.
8. Ефимова Л.Е., Фролова Н.Л. Гидрологический мониторинг в пределах особо охраняемых природных территорий // *Вода: химия и экология*. 2013. № 5 (59). С. 20–28.

9. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Пикиноров П.В. Эколого-гидрохимическая характеристика водно-болотных угодий «Верхнее Двубье» // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. 2017. Т. 3. № 2. С. 8–21.

10. Khatri N., Tyagi S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas // *Frontiers in Life Science*. 2015. V. 8. No. 1. P. 23–39.

11. Бузмаков С.А., Кувшинская Л.В., Жекин А.В., Кулакова С.А., Гатина Е.Л., Зайцев А.А. Оценка современного состояния особо охраняемой природной территории «Черняевский лесопарк г. Перми» // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2009. Т. 11. № 1 (3). С. 408–413.

12. Ильина В.Н., Савченко А.А. Содержание различных веществ в почвах и поверхностных водах на территории некоторых памятников природы Кинель-Черкасского района Самарской области // *Карельский научный журнал*. 2014. № 1 (6). С. 119–121.

13. Wahed M., Abdel S.M., Mohamed E.A., Wolkersdorfer C., El-Sayed M.I., M'nif A., Sillanpää M. Assessment of water quality in surface waters of the Fayoum watershed, Egypt // *Environmental Earth Sciences*. 2015. V. 74. P. 1765–1783.

14. Государственный природный заказник Пижемский. Киров: Кировская областная типография, 2008. 19 с.

15. Ворончихин Е.И. По Вятскому краю: Путеводитель по примечательным объектам природы. Ч. 1. Киров: Вятка, 1996. 255 с.

16. Энциклопедия земли Вятской. Т. 7. Природа. Киров: Вятка, 1997. 607 с.

17. Адамович Т.А., Товстик Е.В., Соловьёва Е.С., Ашихмина Т.Я., Березин Г.И., Прокашев А.М., Савиных В.П. Оценка состояния почв особо охраняемых природных территорий Кировской области // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 4. С. 46–52.

18. Перечень рыбохозяйственных нормативов, предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

19. Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.

20. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 442 с.

21. Ашихмина Т.Я., Кутявина Т.И., Домнина Е.А. Изучение процессов эвтрофикации природных и искусственно созданных водоёмов (литературный обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2014. № 3. С. 6–13.

References

1. Borodina E.V., Borodina U.O. Water chemistry formation in lakes of specially protected natural areas in the

Altay Mountains: case study of the Mul'ta River // *Water Resources*. 2019. V. 46. No. 4. P. 582–594. doi: 10.1134/S0097807819040055

2. Lukyanova N.V., Myaskov A.V. The influence of mining on specially protected natural territories // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2007. No. 6. P. 223–330 (in Russian).

3. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A. Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and Western Siberia // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. No. 6. P. 065010. doi: 10.1088/1748-9326/ab17ea

4. Bucher K., Zhou W., Stober I. Rocks control the chemical composition of surface water from the high Alpine Zermatt area (Swiss Alps) // *Swiss Journal of Geosciences*. 2017. V. 110. P. 811–831. doi: 10.1007/s00015-017-0279-y

5. Tomilina I.I., Gremyachikh V.A., Grebenyuk L.P. Ecotoxicological monitoring in lakes of Northwestern and Central European Russia located in specially protected natural areas // *Water Resour.* 2014. V. 41. P. 312–318. doi: 10.1134/S0097807814030154

6. Adamenko Ya.S., Arkhypova L.M., Mandryk O.M. Territorial normative of quality of hydroecosystems of protected territories // *Hydrobiological Journal*. 2017. V. 53. No. 2. P. 50–58.

7. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Knyazeva E.V., Ashikhmina T.Ya. Studying the ionic composition of the water of the lakes of the Nurgush State Nature Reserve // *Water and ecology: problems and solutions*. 2017. No. 4 (72). P. 3–12 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2017.22.4.3-12

8. Efimova L.E., Frolova N.L. Hydrological monitoring within specially protected natural territories // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2013. No. 5 (59). P. 20–28 (in Russian).

9. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G., Pikinerov P.V. Ecological and hydrochemical characteristics of the wetlands “Upper Bilateral” // *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopolzovanie*. 2017. V. 3. No. 2. P. 8–21 (in Russian). doi: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-8-21

10. Khatri N., Tyagi S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality

in rural and urban areas // *Frontiers in Life Science*. 2015. V. 8. No. 1. P. 23–39. doi: 10.1080/21553769.2014.933716

11. Buzmakov S.A., Kuvshinskaya L.V., Zhekin A.V., Kulakova S.A., Gatina E.L., Zaitsev A.A. Assessment of the current state of the specially protected natural area “Chernyaevsky Forest Park of Perm” // *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009. V. 11. No. 1 (3). P. 408–413 (in Russian).

12. Ilyina V.N., Savchenko A.A. The content of various substances in soils and surface waters in the territory of some natural monuments of the Kinel-Cherkassky district of the Samara region // *Karelskiy nauchnyy zhurnal*. 2014. No. 1 (6). P. 119–121 (in Russian).

13. Wahed M., Abdel S.M., Mohamed E.A., Wolkersdorfer C., El-Sayed M.I., M'nif A., Sillanpää M. Assessment of water quality in surface waters of the Fayoum watershed, Egypt // *Environmental Earth Sciences*. 2015. V. 74. P. 1765–1783. doi: 10.1007/s12665-015-4186-0

14. The state nature reserve Pizhemsky. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2008. 19 p. (in Russian).

15. Voronchikhin E.I. In Vyatka region: A guide to remarkable natural sites. Part 1. Kirov: Vyatka, 1996. 255 p. (in Russian).

16. Encyclopedia of the land of Vyatka. V. 7. Nature. Kirov: Vyatka, 1997. 607 p. (in Russian).

17. Adamovich T.A., Tovstik E.V., Solovyova E.S., Ashikhmina T.Ya., Berezin G.I., Prokashev A.M., Savinykh V.P. Assessment of the state of soils in specially protected natural reservations of the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 4. P. 46–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-046-052

18. The list of fishery standards, maximum permissible concentrations (MPC) and tentatively safe exposure levels of harmful substances to water of water bodies of fishery importance. Moskva: VNIRO, 1999. 304 p. (in Russian).

19. Nikanorov A.M. Hydrochemistry. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 2001. 444 p. (in Russian).

20. Alekin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 442 p. (in Russian).

21. Ashikhmina T.Ya., Kut'yavina T.I., Domnina E.A. Studying the eutrophication of natural and artificially created reservoirs (literature review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 3. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-006-013

Накопление тяжёлых металлов и мышьяка в талломах *Cladonia rangiferina* на Европейском Севере России

© 2020. В. В. Елсаков¹, к. б. н., с. н. с.,И. Г. Захожий¹, к. б. н., н. с., А. С. Шуйский², м. н. с.,¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,²Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54,
e-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Исследовали содержание тяжёлых металлов (ТМ) (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Mn, Fe, Hg) и As в образцах кладонии оленьей (*Cladonia rangiferina* L.), отобранных на отдельных участках в долготных границах Европейского Севера России (73 точки сборов). Установлены условно фоновые показатели содержания элементов в талломах для удалённых от промышленных центров территорий и диапазоны их варибельности на участках в зоне влияния промышленных объектов. Наиболее значимыми факторами, определяющими уровень аккумуляции ТМ, являются удалённость от производственных объектов чёрной и цветной металлургии, приближённость к технологическим площадкам и минеральным отсыпкам инженерной инфраструктуры (дороги, отвалы, песчаные карьеры, площадки буровых). Средние значения содержания As, Cu, Co и Ni в талломах лишайника, отобранных в импактной зоне комбината по переработке медно-никелевого сырья (Мурманская область), в 1,4–22 раза выше максимально допустимого уровня, приводимого в нормативных документах для растительных кормов сельскохозяйственных животных. В сообществах тундровой и лесной зоны Европейского Северо-Востока выявлены локальные участки с повышенной концентрацией ряда ТМ. Существенные отклонения содержания ТМ в слоевищах могут быть следствием осаждения на поверхности и проникновения в межклеточное пространство талломов пылевых минеральных частиц, поступающих с выбросами промышленных объектов и транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: лишайники, *Cladonia rangiferina*, Европейский Север России, тяжёлые металлы.

Accumulation of heavy metals and arsenic in *Cladonia rangiferina* in the European north of Russia

© 2020. V. V. Elsakov¹ ORCID: 0000-0001-7111-5161¹I. G. Zakhozhii¹ ORCID: 0000-0003-0918-745X²A. S. Shuyskiy² ORCID: 0000-0002-6928-9354²¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Science,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,²Institute of Geology of Komi Scientific Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Science,
54, Pervomayskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Lichens can accumulate different pollutants and serve as a source of that element's migration in trophic chains. The content of heavy metals (HM) (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Mn, Fe, Hg) and As was estimated in samples of *Cladonia rangiferina* L. taken in the European North of Russia. Sampling areas included the territory of the western part of the Kola Peninsula, Kanin Peninsula, Timan, Malozemelskaya, Bolshezemelskaya and Yamal Peninsula tundras and the taiga zone of the Komi Republic. The content of HM and As in lichens thalli for native territories and diapasons of their variability in the zone of influence of industrial impacts facilities are established. The average content of main toxic elements in the lichen from the intact territories of the European Northeast was in the range of 0.5–1.8 mg/kg for Pb; 1.0–2.7 mg/kg for Ni; 0.1–0.7 mg/kg for Co; 0.1–0.5 mg/kg for As and about 0.1 mg/kg for Cd. The content of Hg in lichen samples in the study area varied from 9.0 to 51.0 µg/kg. The distance from industrial pollutant emission sources (mainly ferrous and non-ferrous metallurgy) and proximity to technological sites and mineral dumping of engineering infrastructure were the most significant factors determining the level of HM accumulation. The average content of HM

and As in the thalli from the impact zones of the copper-nickel processing plant (Kola Peninsula) was: Ni – 65.2, Cu – 44.4, Co – 2.3, As – 0.7 mg/kg. This is 1.4–22 times higher than the sanitary standards level given in the regulatory documents for grass feed of farm animals. Local areas with an increased concentration of several HMs were identified in the communities of the tundra and forest zones of the European Northeast. Significant deviations of the HM content in thalli were related with dust mineral particles deposits (on the surface and the intercellular space of thalli) of coming from emissions of industrial facilities and transport infrastructure. Elemental analysis of dust particles showed that Fe, Al, and Si compounds predominate in their composition. Some mineral particles are characterized by a relatively high content of Ca, Ti, and Ni.

Keywords: lichens, *Cladonia rangiferina*, European North of Russia, heavy metals.

Лишайники рода *Cladonia* широко распространены на территории Европейского Севера России и Западной Сибири. Представители этого рода наряду с *Cetraria* sp. и *Flavocetraria* sp. составляют основу зимнего рациона северного оленя. Известно, что лишайники способны аккумулировать различные поллютанты, в том числе тяжёлые металлы (ТМ) [1–3], и служат источником поступления загрязняющих веществ в трофические цепи [4]. Из токсичных элементов наибольшее ветеринарно-санитарное и токсикологическое значение имеют Hg, Cd, Pb и As, что и обуславливает актуальность мониторинговых исследований содержания данных элементов в лишайниках.

Цель работы состояла в выявлении закономерностей накопления тяжёлых металлов и As в талломах *Cladonia rangiferina* L. в тундровых и лесных фитоценозах на территории

Европейского Севера России и Западной Сибири (полуостров Ямал), а также оценке потенциально возможных фоновых показателей и пределов аккумуляции ТМ и As для лишайников в условиях воздействия антропогенных факторов.

Материалы и методы

Образцы лишайника собраны на 73 участках, расположенных в лесных, болотных (грядово-мочажинные комплексы), тундровых и горно-тундровых фитоценозах (рис. 1, табл.).

Для количественного химического анализа использовали верхние (3–5 см) части подцедев. Минерализацию образцов осуществляли под воздействием микроволнового поля в присутствии концентрированной HNO₃ и H₂O₂. Анализ содержания кислотораство-

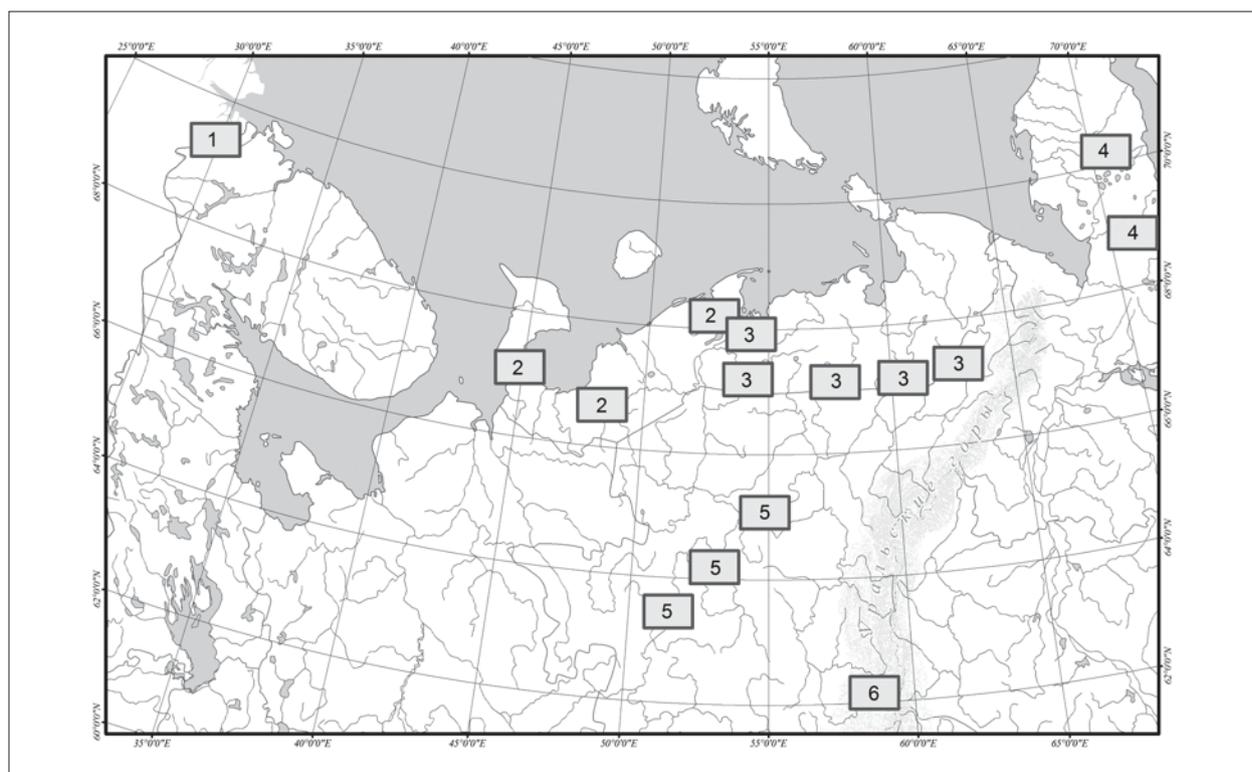


Рис. 1. Районы отбора образцов *Cladonia rangiferina* (обозначения см. в табл.)

Fig. 1. Schematic map of the *Cladonia rangiferina* sampling localities (see Table and text for designations)

Таблица / Table

Химический состав талломов *Cladonia rangiferina* на Европейском Севере России
Chemical composition of the *Cladonia rangiferina* thallus from European North of Russia

Участки отбора Sampling area	n	Содержание элементов (мг/кг) / Element content (mg/kg)									
		Cu	Pb	Cd	Zn	Ni	Co	Mn	Fe	As	Hg*
1. Мурманская область, заповедник «Пасвик» Murmansk region, "Pasvik" reserve	19	<u>5.1-109*</u> 44,4	<u>0.5-3.3</u> 1,5	<u>0.1-0.28</u> 0,17	<u>9.3-19.0</u> 14,6	<u>9.0-160</u> 65,2	<u>0.3-6.4</u> 2,3	<u>10-120</u> 55,2	<u>74-930</u> 417,2	<u>0.1-1.7</u> 0,7	<u>14-46</u> 27,0
2. Канинская, Тиманская, Малоземельская тундры Kanin, Timan, Malozemelskaya tundra	14	<u>0.9-2.0</u> 1,4	<u>0.5-2.0</u> 1,1	<u><0.08-0.1</u> 0,1	<u>9.5-27.0</u> 19,6	<u>0.59-9.0</u> 1,9	<u>0.10-0.22</u> 0,12	<u>19-330</u> 86,4	<u>53-340</u> 136,9	<u><0.1-0.1</u> 0,1	<u>12-51</u> 28,7
3. Большеземельская тундра (Ненецкий АО, Республика Коми) Bolshezemelskaya tundra (Nenets and Komi administrative districts)	16	<u>0.8-7.4</u> 1,9	<u><0.5-5.9</u> 1,4	<u><0.08-0.2</u> 0,11	<u>6.7-29.0</u> 16,0	<u>0.1-12.0</u> 2,7	<u><0.1-1.5</u> 0,34	<u>51.0-180</u> 113,7	<u>70.0-2400</u> 346,4	<u><0.1-0.70</u> 0,48	<u>21-38</u> 28,0
4. Полуостров Ямал, южная тундра Yamal Peninsula, southern tundra	5	<u>1.6-2.3</u> 1,8	<u>0.2-0.9</u> 0,5	<u><0.1-0.1</u> 0,1	<u>12.3-21.0</u> 16,4	<u>0.8-4.5</u> 2,7	<u>0.2-1.9</u> 0,7	<u>55.0-170</u> 101	<u>230-410</u> 332,0	<u>0.1-0.2</u> 0,1	<u>23-40</u> 30,4
5. Северная тайга, Республика Коми / North taiga of Komi Republic	6	<u>1.0-2.1</u> 1,8	<u>0.5-2.0</u> 1,2	<u><0.1-0.24</u> 0,1	<u>10.9-20.0</u> 15,2	<u>0.1-2.7</u> 1,0	<u>0.1-0.2</u> 0,12	<u>41.0-180</u> 96,3	<u>60-220</u> 111	<u><0.1-0.1</u> 0,1	<u>9.0-23</u> 16,5
6. Средняя тайга Республики Коми, Печоро-Ильчский заповедник The middle taiga of Komi Republic, Pechora-Pych Reserve	13	<u>0.7-5.9</u> 1,7	<u>0.4-6.2</u> 1,8	<u><0.1-0.25</u> 0,1	<u>11.0-26.0</u> 17,3	<u>0.5-5.6</u> 2,3	<u>0.1-0.73</u> 0,25	<u>71.0-200</u> 112,7	<u>57-1100</u> 286,1	<u>0.1 0.22</u> 0,14	<u>11.0-43.0</u> 23,0

Примечание: * – показаны пределы значений (числитель) и средние величины (знаменатель), n – количество образцов, * – мг/кг.
Note: * – limits of values (numerator) and average values (denominator), n is the number of samples, * – µg/kg.

римых форм Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Mn, Fe и As выполняли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ФР.1.31.2006.02149) на спектрометре Spectro Ciros CCD («SPECTRO Analytical Instruments», Германия), ртути – методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ФР.1.31.2007.03904) на анализаторе РА-915М («ЛЮМЭКС», Россия). Изучение локализации металлов в талломах лишайника осуществили с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega3 LMH («Tescan», Чехия) в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Анализ химического состава минералов произведён в режиме EDS с использованием энергодисперсионного детектора INCA X-MAX (Oxford Instruments plc, Великобритания).

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов выявил значительную вариабельность накопления ТМ талломами *C. rangiferina* в пределах изучаемой территории (табл.).

Наиболее высокое содержание Cu, Cd, Ni, Co и As отмечено в образцах, собранных в зоне влияния АО «Кольская ГМК» ПАО «Норникель» (Мурманская область, заповедник «Пасвик») [5]. Максимальные концентрации Cu и Ni в талломах лишайников на данной территории более чем в десять раз выше показателя для тундровой и таёжной зоны Республики Коми и Ненецкого АО. Сравнение средних, для каждой из изученных территорий, величин содержания ТМ указывает на значительное полиметаллическое загрязнение вблизи производственных объектов АО «Кольская ГМК» и существенную аккумуляцию данных элементов лишайниками. Средние значения содержания As, Cu, Co и Ni в талломах *C. rangiferina* в 1,4–22 раза выше максимально-допустимых уровней (МДУ), приводимых в нормативных документах для грубых и сочных кормов сельскохозяйственных животных [6].

Образцы лишайников из таёжных фитоценозов на территории Республики Коми и Ненецкого АО характеризовались сравнительно низкими значениями средних величин содержания большинства ТМ и As. Абсолютные значения содержания Cu, Pb, Fe и Zn в талломах *C. rangiferina* не превышают или сопоставимы с приводимыми в литературе [7] величинами накопления ТМ для эпигейных видов лишайников. В пределах Европейского Северо-Востока, в отличие от западной части

Кольского полуострова [8], нами не выявлено чётких закономерностей пространственного распределения ТМ, что указывает на возможность реализации различных сценариев поступления поллютантов. Лишайники, в отличие от сосудистых растений, поглощают минеральные элементы всей поверхностью, как из атмосферы, так и из субстрата, что зачастую затрудняет идентификацию источника загрязнения. Так, помимо поступления минеральных элементов с осадками и пылевыми частицами, на аккумуляцию ТМ лишайниками значительное влияние может оказывать их содержание и подвижность в верхних почвенных горизонтах [9].

Средние значения содержания ТМ и As в талломах *C. rangiferina* на Европейском Северо-Востоке близки к фоновым показателям и могут быть использованы при разработке критериев оценки качества и безопасности кормовых лишайников. Полученные данные свидетельствуют, что содержание As и ТМ (за исключением Fe) в талломах *C. rangiferina* не превышают величины МДУ для грубых и сочных кормов сельскохозяйственных животных [6].

Следует отметить, что отдельные образцы из северотаёжных фитоценозов имели относительно высокое содержание Co, Cu, Pb и Fe (табл.), несмотря на удалённость участков их отбора от крупных промышленных источников выбросов. Моделирование обратных траекторий поступления воздушных масс к участкам отбора образцов с пастбищ, на которых проводится зимний выпас оленей СПК «Ижемский оленевод» с использованием модели «HYSPLIT» (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), показало возможный принос загрязнителей от удалённых источников эмиссии, расположенных на территории соседних регионов. Возможным источником поступления загрязняющих веществ являются крупные металлургические предприятия Пермской, Свердловской, Владимирской областей, Красноярского края.

В сообществах тундровой зоны Европейского Северо-Востока России отмечаются локальные участки с повышенным содержанием ряда ТМ, прежде всего Fe (табл.), в образцах *C. rangiferina*. Часто они приближены к промышленным объектам и транспортной инфраструктуре. Так, в районе аэропорта пос. Харьяга (Ненецкий АО) в талломах отмечаются наиболее высокие (по региону) содержания Fe (2400 мг/кг), Pb (5,9 мг/кг), Ni (12 мг/кг) и Co (1,5 мг/кг). Считается, что значительная доля валового содержания металлов в лишайниках может быть сосредото-

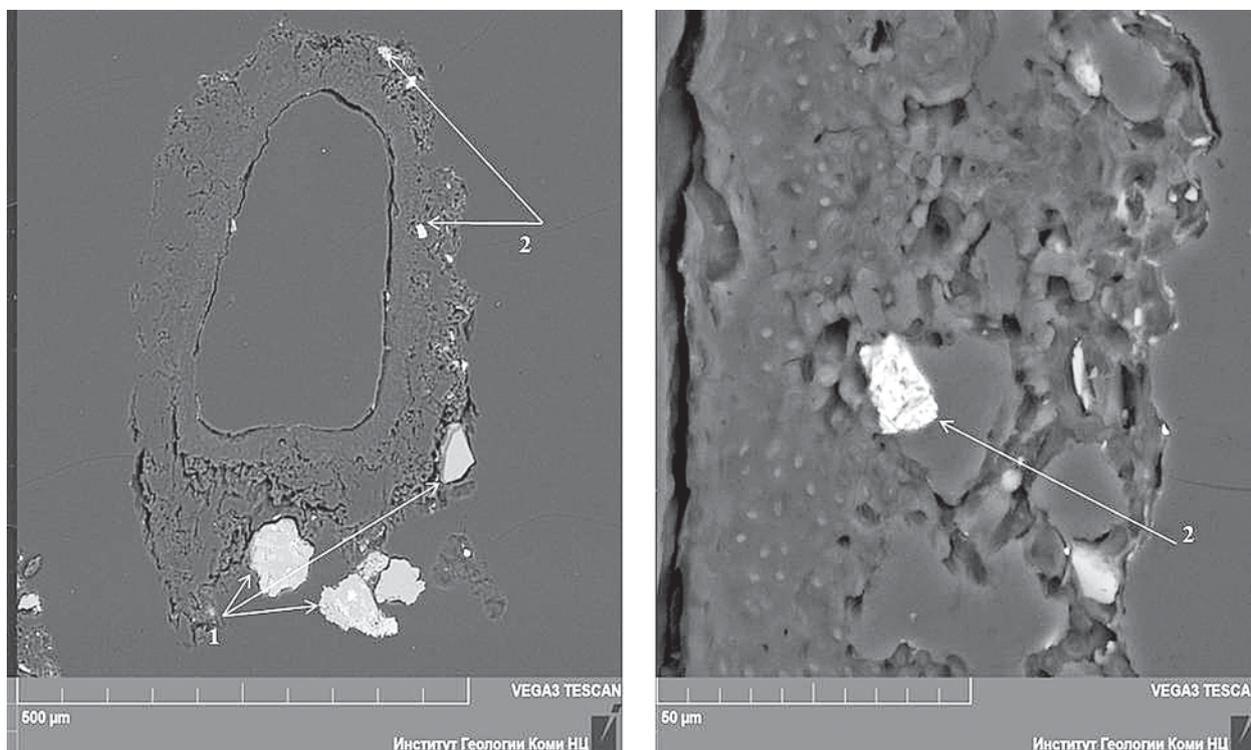


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения поперечного среза таллома *Cladonia rangiferina*, полученные в режиме обратно-рассеянных электронов: 1 – минеральные частицы на поверхности таллома; 2 – минеральные частицы в межклеточном пространстве талломов

Fig. 2. Scanning electron microscopy (backscattered electron mode) micrographs of *Cladonia rangiferina* thallus cross section: 1 – mineral particles on the thallus surface; 2 – mineral particles in the intercellular space of the thallus

чена в пылевых частицах, локализованных на поверхности и/или инкорпорированных в межклеточное пространство талломов [3, 10, 11]. Анализ образцов *C. rangiferina*, собранных вблизи песчаных насыпей пос. Харьяга, выявил присутствие на поверхности талломов и его внутренних полостях многочисленных минеральных включений (рис. 2).

Элементный анализ пылеватых частиц показал, что в их составе преобладают соединения железа, алюминия и кремния. Помимо этого, для некоторых частиц характерно сравнительно высокое содержание Ti, Ni и Ca. В перечне выявленных элементов также отмечены Mg, P, V, Cr и Mn. Химический состав пылеватых частиц позволяет отнести их к следующим минералам: титанит, пирит, эпидот, рутил, ильменит, полевые шпаты, кварц, барит, хромит, хлорит и др.

Осаждение на поверхности талломов минеральных частиц следует рассматривать как один из важных источников загрязнений лишайников. Так, на отдельных участках автопроезда вдоль магистрального газопровода «Бованенково-Ухта» на территории ПСК «Оленевод» протяжённость пылевых выбросов от автодороги фиксируется на расстоянии до 1 км [12]. Наблюдается аккумуляция пыли на зе-

лёных частях растений в количестве до 10 г/м². По данным снегомерной съёмки, выполненной вблизи открытых карьеров доломитов осаждаемые твёрдые частицы вокруг источников выбросов формируют ореолы рассеивания, аккумулирующие до 30 г/м² пыли [13].

Заключение

Таким образом, в тундровых и таёжных фитоценозах Европейского Севера накопление ТМ и As в талломах лишайника *C. rangiferina* определяется фоновым уровнем поступления загрязнителей, близостью к объектам промышленных выбросов, а также трансграничным переносом поллютантов. Существенные отклонения содержания ряда ТМ в слоевищах могут быть следствием осаждения на поверхности и проникновения в межклеточное пространство талломов минеральных частиц, поступающих с пылевыми выбросами от промышленных объектов и транспортной инфраструктуры. Полиметаллическое загрязнение территории в результате производственной деятельности по переработке медно-никелевого сырья (Мурманская область) приводит к аккумуляции кормовыми лишайниками значительных количеств токсичных элементов, таких как Cu, Ni, Co и As.

Авторы благодарят сотрудников экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН за выполнение анализа химического состава талломов. Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН 2018–2020 гг. Подпрограмма Арктика. Проекты № 18-9-4-5 и № 18-4-4-20.

Литература

1. Węgrzyn M.H., Wietrzyk P., Lehm S., Beata Cykowska-Marzencka B., Polkowska Ż. Annual variability of heavy metal content in Svalbard reindeer faeces as a result of dietary preferences // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. V. 25. P. 36693–36701.

2. Garty J. Biomonitoring heavy metal pollution with lichens // *Protocols in Lichenology* / Eds. I. Kranner, R. Beckett, A. Varma. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. P. 458–482.

3. Головкин Т.К., Шелякин М.А., Захожий И.Г., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н. Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таёжной зоне // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 2. С. 44–53.

4. Григорьева А.А., Миронова Г.Е., Олесова Л.Д., Кривошапкина З.Н., Семёнова Е.И., Ефремова А.В., Константинова Л.И., Яковлева А.И., Охлопкова Е.Д. Тяжёлые металлы как фактор загрязнения окружающей среды в условиях криолитозоны // *Проблемы региональной экологии*. 2018. № 6. С. 51–58.

5. Елсаков В.В., Поликарпова Н.В. Спутниковые методы в анализе изменений запаса лишайников в фитоценозах заповедника «Пасвик» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. № 3. Т. 12. С. 87–97.

6. Временный максимально допустимый уровень содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (ВМДУ-87). Утв. ГУВ Госагропрома СССР от 07.08.87 № 123-4/281-87 [Электронный ресурс] <http://www.fsvps.ru/fsvps/download/attachment/145066/mdu.pdf> (Дата обращения: 20.02.2020).

7. Pakarinen P. Nutrient and trace metal content and retention in reindeer lichen carpets of finnish ombrotrophic bogs // *Annales Botanici Fennici*. 1981. V. 18. P. 265–274.

8. Елсаков В.В., Новаковский А.Б., Поликарпова Н.В. Пространственные различия в аккумуляции элементов талломами лишайника *Cladonia rangiferina* на территории заповедника «Пасвик» // *Труды КарНЦ РАН. Сер. Экологические исследования*. 2018. № 5. С. 3–14.

9. Елькина Г.Я., Денева С.В., Лаптева Е.М. Тяжёлые металлы в системе почва–растение в биогеоценозах Большеземельской тундры // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 3. С. 41–47.

10. Garty J., Galun M., Kessel M. Localization of heavy metals and other elements accumulated in the lichen thallus // *The New Phytologist*. 1979. V. 82. P. 159–168.

11. Mikhailova I.N., Sharunova I.P. Dynamics of heavy metal accumulation in thalli of the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* // *Russian Journal of Ecology*. 2008. V. 39. No. 5. P. 346–352.

12. Патова Е.Н., Стенина А.С., Тикушева Л.Н., Лоскутова О.А., Сивков М.Д. Комплексная оценка водных экосистем бассейна реки Кары, трансформированных в результате транспортировки углеводов // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2018. Т. 29. № 2. С. 30–50.

13. Бурмистрова В.В. Оценка состояния атмосферного воздуха в районе функционирования карьеров по добыче строительных материалов // *Народное хозяйство Республики Коми*. 2006. № 2. Т. 15. С. 224–227.

References

1. Węgrzyn M.H., Wietrzyk P., Lehm S., Beata Cykowska-Marzencka B., Polkowska Ż. Annual variability of heavy metal content in Svalbard reindeer faeces as a result of dietary preferences // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. V. 25. P. 36693–36701. doi: 10.1007/s11356-018-3479-8

2. Garty J. Biomonitoring heavy metal pollution with lichens // *Protocols in Lichenology* / Eds. I. Kranner, R. Beckett, A. Varma. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. P. 458–482.

3. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Zakhozhiy I.G., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. The response of lichens to the environmental pollution under the bauxite mining in the taiga zone // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1

4. Grigoreva A.A., Mironova G.E., Olesova L.D., Krivoshapkina Z.N., Semenova E.I., Efremova A.V., Konstantinova L.I., Yakovleva A.I., Okhlopko E.D. Heavy metals as a factor of environmental pollution in cryolithozone conditions // *Problemy regionalnoy ekologii*. 2018. No. 6. P. 51–58 (in Russian). doi: 10.24411/1728-323X-2019-16051

5. Elsakov V.V., Polikarpova N.V. Satellite methods for the analysis of changes in lichen cover in vegetation communities of Pasvik Nature Reserve // *Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2015. No. 3. V. 12. P. 87–97 (in Russian).

6. Temporary maximum permissible levels of certain chemical elements and gossypol in grass feed for farm animals and feed additives. (VMDU–87). Utv. GUV Gosagroproma SSSR ot 07.08.87 No. 123-4/281-87. [Internet resource] <http://www.fsvps.ru/fsvps/download/attachment/145066/mdu.pdf> (Accessed: 20.02.2020) (in Russian).

7. Pakarinen P. Nutrient and trace metal content and retention in reindeer lichen carpets of finnish ombrotrophic bogs // *Annales Botanici Fennici*. 1981. V. 18. P. 265–274.
8. Elsakov V.V., Novakovskiy A.B., Polikarpova N.V. Spatial differences in the accumulation of elements by the thalli of the *Cladonia rangiferina* lichen in the “Pasvik” Reserve // *Trudy KarNTs RAN. Ser. Ekologicheskkiye issledovaniya*. No. 5. 2018. P. 3–14 (in Russian). doi: 10.17076/eco641
9. El’kina G.Ya., Deneva S.V., Lapteva E.M. Heavy metals in soil–plant system in biogeocenoses of the Bolshzemelskaya Tundra // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 41–47 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-041-047
10. Garty J., Galun M., Kessel M. Localization of heavy metals and other elements accumulated in the lichen thallus // *The New Phytologist*. 1979. V. 82. P. 159–168. doi: 10.1111/j.1469-8137.1979.tb07571.x
11. Mikhailova I.N., Sharunova I.P. Dynamics of heavy metal accumulation in thalli of the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* // *Russian Journal of Ecology*. 2008. V. 39. No. 5. P. 346–352.
12. Patova E.N., Stenina A.S., Tikusheva L.N., Loskutova O.A., Sivkov M.D. Complex assessment of water ecosystems of the Kara river basin transformed as a result of hydrocarbon transportation // *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 2018. V. 29. No. 2. P. 30–50 (in Russian). doi: 10.21513/0207-2564-2018-2-30-50
13. Burmistrova V.V. The atmospheric air assessment of the area of building materials extraction quarries // *Narodnoye khozyaystvo Respubliki Komi*. 2006. No. 2. V. 15. P. 224–227 (in Russian).

Иммунологическая и селекционная ценность новых линий яровой тритикале

© 2020. Т. К. Шешегова¹, д. б. н., зав. лабораторией,
Г. А. Баталова¹, академик РАН, зам. директора,
Л. А. Беспалова², академик РАН, зав. отделом,
В. Я. Ковтуненко², д. с.-х. н., г. н. с., В. В. Панченко², к. с.-х. н., в. н. с.,
А. П. Калмыш², н. с.,

¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

²Национальный центр зерна имени П. П. Лукьяненко,
350012, Россия, г. Краснодар, Центральная усадьба, д. 12,
e-mail: g.batalova@mail.ru

Для поиска перспективных сортов тритикале в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в 2017–2018 гг. изучены 26 новых линий из Краснодарского края и Беларуси. Проанализировано иммунологическое состояние агрофитоценозов, изучен продукционный и онтогенетический потенциал линий. Высокой устойчивостью к спорынье характеризовались 6 линий с поражением до 0,3%, одна линия была иммунна. Высокую устойчивость к корневым инфекциям проявила лишь одна линия с уровнем поражения 8,9%, 7 линий были умеренно устойчивы (развитие болезни до 15,0%). Степень поражения септориозом была слабой – не более 5,0%. При микробиологическом анализе семян идентифицированы представители 8 таксонов: *Bipolaris* spp., *Alternaria* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. В контаминанте доминировали микромицеты с тёмноокрашенным мицелием, частота которых составила в среднем 65,5%, далее бактериальная инфекция (частота в среднем 21,3%), которая негативно влияла на лабораторную всхожесть семян. Наибольшая урожайность (5,60–6,15 т/га) получена у четырёх линий, которые существенно превышали стандартный сорт Ровня. Спелость зерна наступила в конце августа, что косвенным образом свидетельствует о соответствии агроэкологических условий Кировской области биологическим требованиям яровой тритикале.

Ключевые слова: яровая тритикале, устойчивость, структура патокомплекса семян, спорынья, септориоз, корневые гнили, урожайность.

Immunological and breeding value of new spring triticale lines

© 2020. T. K. Sheshegova¹ ORCID: 0000-0003-2371-4949^{*}

G. A. Batalova¹ ORCID: 0000-0002-3491-499X^{*} L. A. Bepalova² ORCID: 0000-0003-3844-9682^{*}

V. Ya. Kovtunencko² ORCID: 000-0002-9466-7273^{*} V. V. Panchenko² ORCID: 0000-0002-8520-6002^{*}

A. P. Kalmysh² ORCID: 0000-0001-6114-0697^{*}

¹Federal Agricultural Research Center of the North-East,
166a, Lenina St., Kirov, Russian Federation, 610007,

²National Center of Grain,
12, Centralnaya Usadba, Krasnodar, Russian Federation, 350012,
e-mail: g.batalova@mail.ru

The spring triticale, due to its versatile use and adaptability, is of undeniable interest for introduction into the Kirov region. In order to find promising varieties, 26 new lines from Krasnodar Territory and Belarus were studied in Federal Agricultural Scientific Center of the North-East in 2017–2018. Immunological state of agrophytocenoses was analyzed, productive and ontogenetic potential of lines was studied. Six lines had high resistance to ergot with an impact of up to 0.3%, and one line was immune. Only one line showed high resistance to root infections with an injury level of 8.9%; 7 lines were moderately resistant at the disease developed level up to 15.0%. The degree of damage with septoriosiis was low – not more than 5.0%. The presence of highly disease-resistant lines is very important for environmental improvement by reducing pesticide load. Eight taxa have been identified during microbiological analysis of seeds: *Bipolaris* spp., *Alternaria* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. Micromycetes with dark-painted mycelium dominated in contamination which averaged 65.5%, followed by bacterial

infection (21.3% on average), which negatively affected the laboratory germination of seeds. The highest yield (5.60–6.15 ton/ha), significantly higher than the standard cultivar Rovnya, is obtained at 4 lines. Grain ripeness occurred at the end of August, which indirectly indicates that the agroecological conditions of the Kirov region comply with the biological requirements of the spring triticale.

Keywords: spring triticale, resistance, structure of seed pathogenic complex, ergot, septoriossis, root rot, productivity.

Яровая тритикале – это стабильный, не расщепляющийся на исходные виды гибрид яровых форм пшеницы и ржи, и в филогенетическом отношении это молодая культура. Тритикале менее требовательна к условиям произрастания, чем пшеница, хорошо растёт как на плодородных почвах, так и на песчаных и кислых [1]. Использование культуры разностороннее: в кондитерском, хлебопекарном, спиртовом производстве и для приготовления различных кормов [2, 3]. Серьёзным недостатком тритикале является относительно длительный период вегетации за счёт растянутого цветения и налива зерна, в результате чего она созревает на 5–14 дней позднее пшеницы [4]. Позднеспелость культуры часто приводит к явному или латентному прорастанию зерна на корню, что ведёт к его инфицированию и последующему снижению всхожести семян. Склонность тритикале к прорастанию определяет высокая α -амилолитическая активность зерна, но она же и влияет на более раннее появление всходов относительно других зерновых [5]. Затягивание вегетации растений и позднеспелость ограничивают распространение культуры в северо-восточных регионах РФ. Хотя в Кировской области возможно выращивание таких сортов, как Ровня, Ульяна и Саур, внесённых в Государственный реестр селекционных достижений по Волго-Вятского региону, но районированных для области сортов пока нет. Однако региональный тренд биоклиматических параметров, направленный на удлинение осенней вегетации растений, предполагает полное созревание, успешную акклиматизацию и адаптацию яровой тритикале в области.

Что касается болезней, то она практически не поражается мучнистой росой, видами ржавчины и головни [6, 7], но восприимчива к септориозу (*Septoria nodorum* (Berk) и *Septoria tritici* Rob. ex Desm), спорынье (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.), фузариозу колоса и корневым гнилям (*Fusarium* spp.). В современных фитосанитарно-уязвимых условиях ведения сельхозпроизводства спорынья усиливает поражение многих зерновых культур. Так, в 2017 г. в Кировской области на посевах озимой ржи распространение болезни достигало

5%. Во Владимирской области отмечена тесная отрицательная корреляция между поражением спорыньей и массой зерна с растения тритикале, при увеличении общей кустистости растений увеличивалось и число склероций ($r = 0,56$) [8]. Поражение спорыньей приводит к токсичности зерна и снижению урожайности до 13–15% [9]. Поэтому возделывание устойчивых сортов имеет положительное значение для окружающей среды в связи с исключением или снижением пестицидной нагрузки на полевые агрофитоценозы и негативного влияния антропогенного и техногенного фактора на среду. При этом у новых сортов устойчивость к болезням должна разумно сочетаться с высокими показателями селекционно-ценных признаков и урожайностью.

Исходя из вышеизложенного, целью наших исследований был поиск перспективных для Кировской области новых линий яровой тритикале, обеспечивающих улучшение экологии и имеющих высокий продукционный потенциал.

Объекты и методы

На опытном поле Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого в 2017–2018 гг. изучены 24 новые линии яровой тритикале селекции Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко (Краснодарский край) и 2 линии (Гелио и Э-3082) – из Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси. Почва опытного участка дерново-подзолистая с содержанием гумуса около 2,0%, средним уровнем подвижного фосфора и обменного калия. Посев проводили в первой декаде мая, уборку в 2017 г. – 5 сентября, в 2018 г. – 20 августа. Условия вегетации растений в оба года были избыточно увлажнёнными, что способствовало развитию грибных болезней. Учёт спорыньи проводили в фазу восковой спелости с использованием шкалы [10], согласно которой при поражении посевов до 0,5% сорт относится к высокоустойчивым, до 1,5% – к среднеустойчивым, до 3,0% и выше – к восприимчивым. Септориоз учитывали в период наибольшего

развития болезни по шкале [11], при которой сорт относится к высокоустойчивым при развитии болезни до 5%, устойчивым – до 15%, умеренно устойчивым – до 25%, восприимчивым – до 65%, высоковосприимчивым – более 65%. Учёт корневых гнилей проводили по методике [12] и шкале [13], при которой сорт относится к высокоустойчивым при развитии болезни до 5%, устойчивым – до 10%, умеренно устойчивым – до 15%, среднеустойчивым – до 25%, восприимчивым – более 25%. Структуру патокомплекса семян изучали после выделения микроорганизмов в чистую культуру. Для этого семена предварительно обеззараживали в 0,5%-ном растворе $KMnO_4$ в течение 20 мин с последующим промыванием дистиллированной водой. Затем в стерильном боксе их раскладывали по 10 штук в чашки Петри на картофельно-глюкозный агар (КГА) в 3 кратной повторности и помещали в термостат при 23–25 °С. Через 5 суток чашки просматривали и выросшие вокруг зерновок колонии пересевали на свежий КГА. Идентификацию микромицетов проводили на 14 день. Для этого использовали микроскоп Биолам с увеличением от 40 до 1600х и справочную литературу [14–16]. Частоту встречаемости рода (вида) оценивали по числу зерновок, в которых он встречался, и выражали в процентах от общего количества инфицированных семян. Для обработки результатов применяли пакет селекционно-ориентированных и биометрико-генетических программ AGROS, версия 2.07.

Результаты и обсуждение

В условиях жёсткого провокационного фона *S. purpurea* изучаемые образцы яровой тритикале дифференцировались от иммунных до восприимчивых. Высокую устойчивость имели шесть из них, с уровнем поражения до 0,5%, у линии 03–113ят2–11 поражение отсутствовало (табл. 1). К среднеустойчивым генотипам с поражением до 1,2% были отнесены 9 форм, в том числе сорт, используемый в системе Государственного испытания в качестве стандарта – Ровня, к восприимчивым – 6 линий с поражением от 1,5 до 5,2%. Степень поражения листьев септориозом была незначительной, а на колосе поражение практически отсутствовало, что исключает инфицированность зерна. В этих условиях все линии тритикале характеризовались высокой устойчивостью к болезни, за исключением сорта Доброе, у которого развитие септориоза составило в среднем 6,5%.

Семена урожая 2017 г. отличались очень низкой лабораторной всхожестью, которая составила в среднем по сортам 53,6%, изменяясь от 38,0% (Ровня) до 72,0% (04–200ят48–23). В этой связи линии были проанализированы на восприимчивость к возбудителям корневых гнилей и структуру семенной инфекции. Установлена широкая дифференциация изучаемого генофонда по отношению к корневым гнилям в начале онтогенеза (фаза 3 листьев), о чем свидетельствует лимит поражённых растений в выборке (35,7–83,3%) и развитие болезни (8,9–43,8%). Высокую устойчивость к корневым гнилям проявила линия 04–200ят48–23 с развитием болезни 8,9%. У 7 линий отмечена умеренная устойчивость при развитии болезни 11,1–15,0%; 11 линий имели среднюю устойчивость и две, в том числе стандарт Ровня, были слабо устойчивы. Таким образом, большая часть линий яровой тритикале характеризуется достаточным уровнем устойчивости к корневым гнилям смешанной этиологии в начале онтогенеза растений, что исключает необходимость предпосевной обработки семян фунгицидами.

Далее с целью обоснования причин низкой всхожести семян провели их микробиологический анализ. Общая инфицированность семян была высокая и составила в среднем 39,2%, варьируя от 20,0% (05–243ят8–10) до 50,0% (03–113ят2–11, 07–288ят26, 09–175ят24, 09–214ят16). В видовой структуре микрофлоры идентифицировали 8 родовых таксонов: *Bipolaris* spp., *Alternaria* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. Данные сообщества микроорганизмов были условно разделены на 3 группы: грибы с тёмноокрашенным мицелием, куда вошли штаммы *Bipolaris* spp., *Alternaria* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp. и *Penicillium* spp.; грибы с розовоокрашенным мицелием – *F. culmorum*, *F. sporotrichoides*, *F. poae* и бактерии – *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. При оценке характера инфицирования семян у большинства линий тритикале установлено доминирование грибов с тёмноокрашенным мицелием. Частота встречаемости этой группы микромицетов у разных линий изменялась от 53,0 до 82,6%, и в среднем составила 65,5%. На втором месте в патогенном комплексе была бактериальная инфекция с частотой встречаемости от 13,4 до 42,9%. Грибы рода *Fusarium*, с небольшой частотой – от 4,0 до 21,0%, были выделены из семян большинства линий, за исключением 04–200ят48–23,

09–206ят22 и сорта Ярило. В исследованиях не установлено явной сортоспецифичности в изменениях микобиотических комплексов семян яровой тритикале. Оценивая их влияние на всхожесть семян можно констатировать более высокую вредоносность бактериальной инфекции по сравнению с грибной, о чём свидетельствует слабая отрицательная зависимость между выявленными бактериями *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. и лабораторной всхожестью семян.

Судя по урожайности новых линий продукционный потенциал их в региональных агроклиматических условиях достаточно высокий – до 7,2 т/га (табл. 2). В 2017 г. выделено 7 линий, превысивших стандарт Ровня на 1,1–2,0 т/га, в 2018 г. на фоне общего снижения урожайности таких линий было 3, а прибавка составила 1,4–1,5 т/га. Наиболее высокая урожайность получена у четырёх линий (09–206ят9, 10–230ят1–31, 09–178ят21 и 09–214ят16), которая в среднем за два года составила 5,6–6,2 т/га при состоянии признака у стандарта Ровня – 4,6 т/га.

Полная спелость зерна изученных линий и сортов наступила в третьей декаде августа, что косвенным образом свидетельствует о соответствии почвенно-климатических условий региона биологическим требованиям яровой тритикале.

Заключение

Таким образом, сорта Ярик, Ярило и 4 новые линии яровой тритикале (03–113ят2–11, 04–200ят48–23, 09–206ят22, 10–230ят1–31) проявили устойчивость к одной или нескольким грибным болезням. Наиболее высокие к стандарту прибавки урожая сформировали линии 09–206ят9, 10–230ят1–31, 09–178ят21 и 09–214ят16, при этом одна из них (10–230ят1–31) сочетает устойчивость с высокой урожайностью. Новые линии, устойчивые к комплексу фитопатогенов, являются основой для снижения негативного влияния пестицидов на окружающую среду. Несмотря на то, что в структуре микроорганизмов семян доминировали грибы (*Bipolaris* spp., *Alternaria* spp.,

Таблица 1 / Table 1

Иммунологическая оценка устойчивых линий яровой тритикале
Immunological assessment of spring triticale resistance lines and varieties

Сорт, линия Variety, line	Поражение, % Defeat, %		Корневые гнили, % Root rot, %		Инфицированные зерновки в пробе, % Infected grains in probe, %	Доля групп микроорганизмов в патокомплексе семян, % Share of microorganism group in seed pathogenic complex, %		
	спорынья ergot	септориоз septoriosis	поражение defeat	развитие development		T*/D*	P	B*/B*
Ярило / Yarilo	0,3	2,6	44,6	11,1	28,0	57,1	0	42,9
Ярик / Yarik	0,2	2,1	46,7	13,8	21,0	66,7	19,0	14,3
03–113ят2–11 03–113yat2–11	0	2,0	51,3	14,6	50,0	64,0	12,0	24,0
04–200ят48–23 04–200yat48–23	1,2	3,6	35,7	8,9	36,0	66,5	0	33,5
07–291ят3 07–291yat3	0,5	2,4	49,3	22,0	37,0	70,0	9,5	20,5
09–178ят21 09–178yat21	0,5	5,0	61,5	21,1	44,0	65,0	9,1	25,9
10–230ят1–31 10–230yat1–31	0,1	1,5	60,0	15,0	34,0	64,8	11,7	23,5
10–255ят1–22 10–255yat1–22	0,2	3,0	56,4	19,5	46,0	74,0	4,3	21,7
11–265ят11 11–265yat11	0,1	2,6	75,0	25,0	46,0	82,6	4,0	13,4
Ровня, St. Rovnya, St.	0,5	2,0	76,7	39,0	38,0	52,6	21,0	26,4

Примечание: T* – грибы с тёмноокрашенным мицелием, P – грибы с розовоокрашенным мицелием; B – бактерии.
Note: D* – dark-colored mycelium fungi; P – pink-colored mycelium fungi; B – bacteria.

Высокоурожайные линии яровой тритикале
Productivity of new spring triticale lines

Сорт, линия Variety, line	2017 год / 2017 year		2018 год / 2018 year		Среднее / Average	
	т/га ton/ha	± к стандарту ± to the stan- dard	т/га ton/ha	± к стандарту ± to the stan- dard	т/га ton/ha	± к стандарту ± to the stan- dard
05–242ят66–5 05–242yat66–5	7,2	+2,0	2,9	-1,0	5,1	+0,5
07–288ят26 07–288yat26	5,9	+0,7	4,6	+0,7	5,3	+0,7
09–175ят24 09–175yat24	5,7	+0,5	4,0	+0,1	4,9	+0,3
09–178ят21 09–178yat21	6,8	+1,6	5,0	+1,1	5,9	+1,3
09–206ят9 09–206yat9	7,1	+1,9	5,2	+1,3	6,2	+1,6
09–214ят16 09–214yat16	6,8	+1,6	4,4	+0,5	5,6	+1,0
10–230ят1–31 10–230yat1–31	6,6	+1,4	5,4	+1,5	6,0	+1,4
10–255ят1–22 10–255yat1–22	5,2	0,0	4,5	+0,6	4,9	+0,3
Ровня, St. Rovnya, St.	5,2	–	3,9	–	4,6	–
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	–	0,8	–	1,0	–	–

Cladosporium spp., *Stemphylium* spp. и *Penicillium* spp.), наибольшее негативное влияние на их всхожесть оказывала бактериальная инфекция (*Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp.), что следует учитывать при подготовке семян к посеву и выборе препарата для их обработки.

Литература

1. Касынкина О.М. Продуктивность яровой тритикале в смешанных посевах с однолетними бобовыми культурами // Нива Поволжья. 2013. № 1 (26). С. 20–24.
2. Peña R.J. Food uses of triticale // Triticale improvement and production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004. P. 37–48.
3. Bird S.H., Rowe J.B., Choct M., Stachiw S., Tyler P., Thompson R.D. *In vitro* fermentation of grain and enzymatic digestion of cereal starch // Recent Advances in Animal Nutrition. 1999. V. 12. P. 53–61.
4. Ковтуненко В.Я., Дудка Л.Ф., Панченко В.В. Изучение сортов яровой тритикале в Краснодарском НИИСХ им. П.П. Лукьяненко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2008. № 5 (14). С. 114–118.
5. Чумикина Л.В., Арапова Л.И., Топтунов А.Ф. Биохимические особенности изменения белкового и ферментативного комплексов и клейковины зерна тритикале при прорастании // Известия вузов. Пищевая технология. 2009. № 2–3. С. 9–12.

6. Hede A.R. A new approach to Triticale improvement // Research Highlights of the CIMMYT Wheat Program 1999–2000. Mexico (CIMMYT). 2001. P. 21–26.
7. Mergoum M., Pfeiffer W.H., Peña R.J., Ammar K., Rajaram S. Triticale crop improvement: the CIMMYT programme // Triticale improvement and production. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004. P. 11–26.
8. Тысленко А.М., Зуев Д.В. Устойчивость ярового тритикале к спорынье // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1 (65). Ч. 3. С. 96–98.
9. Немкович А.И. Спорынья злаковых культур // Защита и карантин растений. 2005. № 29. С. 127–132.
10. Miedaner T., Mirdita V., Geiger H.H. Strategies in breeding for ergot (*Claviceps purpurea*) resistance // International Symposium on Rye Breeding & Genetics. Minsk, Belarus, 2010. P. 83.
11. Saari E.E., Prescott J.M. A scale for appraising the foliar intensity of wheat disease // Plant Disease Reporter. 1975. V. 59 (5). P. 377–380.
12. Бенкен А.А., Хрустовская В.Н. Лабораторная оценка болезнеустойчивых растений и паразитических свойств возбудителей обыкновенной корневой гнили злаков // Труды ВИЗР. 1977. С. 9–13.
13. Григорьев М.Ф. Методические указания по изучению устойчивости зерновых культур к корневым гнилям. Л.: ВАСХНИЛ, ВИР, 1976. 59 с.

14. Билай В.И. Фузарии. Киев: Наукова думка, 1977. 433 с.

15. Гешеле Э.Э. Методическое руководство по фитопатологической оценке зерновых культур. Одесса: ВГСИ, 1971. 180 с.

16. Хасанов Б.А. Определитель грибов – возбудителей «гельминтоспориозов» растений из родов *Bipolaris*, *Drechslera*, *Exserohilum*. Ташкент: Фан, АН УзбССР, 1992. 232 с.

References

1. Kasynkina O.M. Efficiency of spring triticale in the mixed crops with one-year bean cultures // *Niva Povolzhya*. 2013. No. 1 (26). P. 20–24 (in Russian).

2. Peña R.J. Food uses of triticale // *Triticale improvement and production*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004. P. 37–48.

3. Bird S.H., Rowe J.B., Choct M., Stachiw S., Tyler P., Thompson R.D. *In vitro* fermentation of grain and enzymatic digestion of cereal starch // *Recent Advances in Animal Nutrition*. 1999. V. 12. P. 53–61.

4. Kovtunen V.Ya., Dudka L.F., Panchenko V.V. Studying of spring triticale varieties in the P.P. Lukyanenko Krasnodar Agrarian Research Institute // *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008. No. 5 (14). P. 114–118 (in Russian).

5. Chumikina L.V., Arabova L.I., Toptunov A.F. Biochemical features of change in protein and enzymatic complexes and grain gluten of triticale at germination // *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2009. No. 2–3. P. 9–12 (in Russian).

6. Hede A.R. A new approach to Triticale improvement // *Research Highlights of the CIMMYT Wheat Program 1999–2000*. Mexico (CIMMYT). 2001. P. 21–26.

7. Mergoum M., Pfeiffer W.H., Peña R.J., Ammar K., Rajaram S. Triticale crop improvement: the CIMMYT programme // *Triticale improvement and production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004. P. 11–26.

8. Tyslenko A.M., Zuev D.V. Stability of the Yarian triticale to ergot // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. No. 1 (65). Part 3. P. 96–98 (in Russian). doi: 10.18454/IRJ.2227-6017

9. Nemkovich A.I. Ergot in cereal cultures // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2005. No. 29. P. 127–132 (in Russian).

10. Miedaner T., Mirdita V., Geiger H.H. Strategies in breeding for ergot (*Claviceps purpurea*) resistance // *International Symposium on Rye Breeding & Genetics*. Minsk, Belarus, 2010. P. 83.

11. Saari E.E., Prescott J.M. A scale for appraising the foliar intensity of wheat disease // *Plant Disease Reporter*. 1975. V. 59 (5). P. 377–380.

12. Benken A.A., Khrustalevskaya V.N. Laboratory evaluation of disease-resistant plants and parasitic properties of ordinary root rot agents in cereals // *Trudy VIZR*. 1977. P. 9–13 (in Russian).

13. Grigoryev M.F. Methodical instructions on studying of grain crops resistance to root rot. Leningrad: VASKHNIL, VIR. 1976. 59 p. (in Russian).

14. Bilay V.I. Fuzarii. Kiev: Naukova dumka, 1977. 433 p. (in Russian).

15. Geshele E.E. Methodical guide to phytopathologic evaluation of grain crops. Odessa: VGSI, 1971. 180 p. (in Russian).

16. Khasanov B.A. Determinant of fungi-agents of “helminthosporiosis” of plants from the genus *Bipolaris*, *Drechslera*, and *Exserohilum*. Tashkent: Fan, UzbSSR Academy of Sciences, 1992. 232 p. (in Russian).

Проблема скрытого разнообразия цианопрокариот арктических территорий

© 2020. Д. А. Давыдов^{1,2}, к. б. н., с. н. с.,
Е. Н. Патова³, к. б. н., в. н. с., С. С. Шалыгин⁴, к. б. н., исследователь,
А. А. Вильнет¹ к. б. н., с. н. с., И. В. Новаковская³ к. б. н., н. с.,

¹Полярно-альпийский ботанический сад-институт Кольского НЦ РАН,
184209, Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана д. 18А,

²Институт промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,
184209, Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана д. 14А,

³Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

⁴Университет штата Нью-Мексико, Кафедра наук о растениях и окружающей среде,
945, Колледж Драйв, Лас-Крусес, Нью-Мексико, 88003, США,

e-mail: d_disa@mail.ru

Цианопрокариоты (цианобактерии) являются одними из наиболее распространённых фототрофов в Арктике. Простая морфология в сочетании с экологической пластичностью затрудняет идентификацию организмов на основе только анатомических и морфологических признаков. Использование альгологически чистых культур и проведение молекулярно-генетических анализов позволяет выявлять скрытое разнообразие и криптические виды цианобактерий. В настоящем исследовании проведено изучение ряда трудно идентифицируемых штаммов, выделенных из арктических и горно-тундровых почв, из коллекций Института биологии Коми НЦ (СЯКОА) и Полярно-альпийского ботанического сада-института (КРАВГ). Анализируемые штаммы обладают довольно простым строением и по морфологическим признакам относятся к *Leptolyngbya* s.l. Использование анализа нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК и внутреннего спейсера 16S-23S ITS позволило уточнить их родовую принадлежность. Показано, что штаммы *Stenomitos* sp. СЯКОА-С-003-10, *Nodosilinea* sp. КРАВГ-3220 и *Drouetiella* sp. СЯКОА-С-002-10 являются потенциальными новыми видами.

Ключевые слова: Арктика, криптические виды, цианобактерии, *Nodosilinea*, *Stenomitos*, *Drouetiella*, 16S рРНК, 16S-23SITS.

The problem of Cyanobacteria cryptic speciation in the Arctic region

© 2020. D. A. Davydov^{1,2} ORCID: 0000-0002-0866-4747, E. N. Patova³ ORCID: 0000-0002-9418-1601,
S. S. Shalygin⁴ ORCID: 0000-0001-8886-6666, A. A. Vilnet¹ ORCID: 0000-0001-7779-2593,
I. V. Novakovskaya³ ORCID: 0000-0001-5056-9965

¹Polar-Alpine Botanical Garden-Institute Kola SC of RAS,
18A, Fersman's St., Apatity, Russia, 184209,

²Institute of the Industrial Problems of the North FRC KSC of RAS,
14A, Fersman's St., Apatity, Russia, 184209,

³Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Russia, 167982,

⁴New Mexico State University, Department of Plant and Environmental Sciences,
945 College Drive, Las Cruces, NM 88003, USA,

e-mail: d_disa@mail.ru

Cyanobacteria are the most abundant photosynthetic organisms in the Arctic. A simple morphology with a few diagnostics features, together with ecological plasticity complicate their species identification. The use of unialgal cultures with subsequent molecular analyses could reveal cryptic diversity of some cyanobacteria taxa. In this article, we studied a number of difficult-to-identify strains of cyanobacteria isolated from the Arctic (Svalbard archipelago) and mountain-tundras (Khibiny and Subpolar Urals) from terrestrial and near-water habitats. The strains are stored in the

collections of cyanobacteria of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center (SYKOA) and the Polar-Alpine Botanical Garden Institute (KPABG). The article gives the morphological characteristics of the studied strains: the size of the filaments, the shape of trichomes, the presence of nodules and necridic cells, the form of terminal cells. The studied strains of cyanobacteria were characterized by similar morphological structures. Their reliable identification only on the basis of morphology was impossible. The analyzed strains have a fairly simple structure and according to morphological characteristics belong to *Leptolyngbya* s.l. Exploring strains were tested using nucleotide sequence data of 16S rRNA and 16S-23S ITS. This made it possible to clarify their genus affiliation. *Stenomitos* sp. SYKOA-C-003-10, *Nodosilinea* sp. KPABG-3220, and *Drouetiella* sp. SYKOA-C-002-10 appear to be new for science species gathered in high Arctic.

Keywords: Arctic, cryptic species, cyanobacteria, *Nodosilinea*, *Stenomitos*, *Drouetiella*.

Цианопрокариоты (цианобактерии) – разнообразная и широко распространённая в арктических экосистемах группа организмов. Благодаря особенностям метаболизма они отличаются высокой устойчивостью к различным факторам среды и часто являются практически единственными представителями растительного покрова Арктики. Степень изученности биоразнообразия цианопрокариот полярных областей и особенностей их распространения в высокоширотных регионах остаётся очень низкой, что обусловлено трудностью и значительной удалённостью этих районов [1–7].

Выявление альфа-разнообразия цианопрокариот в различных регионах Арктики и Гипоарктики показывает, что потенциальное видовое богатство флор высокоширотных территорий может быть очень высоким. Так, на архипелаге Шпицберген известно 290 видов цианопрокариот, а общий список цианопрокариот евроазиатской Арктики и Гипоарктики насчитывает 679 таксонов. Сравнение выявленного разнообразия показывает, что флора Шпицбергена составляет 7% от общемировой (данные о мировом разнообразии по [8]) и 61% от флоры евроазиатского сектора Арктики.

Современный подход к дифференциации таксонов подразумевает всестороннее изучение организма с учётом его морфологических особенностей, внутриклеточной анатомии, получения молекулярно-генетической информации о последовательностях, пригодных для построения филогении генов, экологии местообитаний, физиологических параметров.

Большая часть этой информации в работах современных исследователей, и все данные, приводимые в литературных источниках, не учитывается, так как идентификация в подавляющем большинстве случаев проводится только на основе морфологии талломов, колоний, трихомов и/или отдельных клеток, типов ветвлений и т. д. Ряд из этих признаков являются экологически пластичными и не могут использоваться для разграничения видов

[9]. Такой традиционный подход обусловлен возможностью использовать нативные образцы, для определения которых необходим только световой микроскоп, а также богатым опытом анатомо-морфологической классификации, отражённой в ключах определителей видов. Использование в исследовании других методов идентификации влечёт за собой необходимость иметь разнообразное дорогостоящее оборудование и значительно увеличивает трудозатраты, но получаемые результаты позволяют определить таксон с большей точностью.

Массив данных о биоразнообразии, накопленный за время, когда идентификация цианопрокариот осуществлялась только на основе световой микроскопии, проблематичен для анализа, так как большинство из описанных в «домолекулярную» эпоху видов включают в себя различные морфотипы из разных географических мест и абсолютно несхожих местообитаний. Широкая экологическая ниша и существование дифференцированных морфотипов явно указывает на наличие криптических видов. Такое скрытое разнообразие показано на примере ряда родов: *Coleofasciculus*, *Geitlerinema*, *Microcoleus*, *Phormidium*, *Scytonema* и др. [9–15].

В частности, в ряде исследований при выявлении видового состава цианопрокариот арктических территорий было показано, что надёжная идентификация цианобактерий, основанная только на морфологии, является проблематичной [6–23].

Существуют разнообразные методы определения таксонов в природных образцах, основанные на выделении ДНК и метагеномном анализе – секвенировании нового поколения (next generation sequencing, NGS), результатом которого является отнесение изученных генов к тому или иному «таксону» (operational taxonomic units, OTU). При таком подходе не очевидна роль вида в экосистеме – существует ли он в виде акинет или активно функционирует. Потенциально выявляемое разнообразие видов, при этом – гораздо выше [24], чем при использовании флористического подхода.

Идентификация видов цианопрокариот на основе анализа последовательностей генов 16S рРНК и 16S-23S ITS подразумевает выделение клональных культур. Проблемы, связанные с применением данного метода, заключаются в определённой – довольно избирательной элективности среды: в искусственных условиях культивируется, как правило, ограниченное число видов. Широкое применение данных локусов облегчает идентификацию, так как база данных GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>) содержит огромное число уже секвенированных штаммов. Вместе с тем, разнообразие видов цианопрокариот, выявляемое посредством данного метода свидетельствует, что потенциальное богатство гораздо выше известного.

Существование криптических видов у цианопрокариот вызвано рядом причин: большими размерами популяций, бесполом размножением, гомологичной рекомбинацией и горизонтальным переносом генов. Чем более близкородственны таксоны, тем более вероятно перенос, быстрая конвергентная эволюция и превалирование генетического разнообразия по сравнению с фенотипическим.

Целью настоящего исследования является морфологическая и молекулярно-генетическая характеристика штаммов цианопрокариот соответствующих *Leptolyngbya* s.l., выделенных из различных районов Арктики и Субарктики.

Материалы и методы

В ходе исследований, проведённых в различных арктических местообитаниях (зарастания речного аллювия, оголённых грунтов, скальные обрастания) как в природных образцах, так и в монокультурах выявлен ряд цианопрокариот, которые на основе морфологических признаков не были достоверно идентифицированы.

В исследование включено шесть штаммов, морфология которых соответствует *Leptolyngbya* s.l., все культуры выращивали на твёрдых или жидких средах BG-11 и Z8 при искусственном освещении 35 мкмоль/(м² · с), в режиме день/ночь – 16/8 ч. Все образцы находятся в коллекциях Института биологии Коми НЦ (СΥΚΟΑ), Полярно-альпийского ботанического сада-института (КРАВГ) и внесены в информационную систему CRIS [25, 26].

Штамм КРАВГ-3220 выделен из приливной полосы морского песчаного марша залива Биллефиорд на арх. Шпицберген. Штамм КРАВГ-3983 был собран на верти-

кальной влажной скальной стенке в ущелье Айкуайвенчорр в Хибинах (Мурманская область). Штамм СΥΚΟΑ-С-002-10 получен из почвенных корочек с оленьих стойбищ около оз. Малое Балбанты на Приполярном Урале. Штамм СΥΚΟΑ-С-015-09 собран в пятнистой каменисто-лишайниковой тундре около оз. Грубепендиты на Приполярном Урале. Местообитанием штамма СΥΚΟΑ-С-003-10 является кустарничково-лишайниково-моховое сообщество на склоне горы Варсанофьевой, Приполярный Урал.

ДНК была выделена с помощью набора NucleoSpin Plant Kit (Macherey-Nagel, Germany). Амплификацию осуществляли с помощью праймеров 1 (5'-CTC TGT GTG CCT AGG TAT CC-3') [27] и 2 (5'-GGG GGA TTT TCC GCA ATG GG-3') [28]. Для секвенирования использовали дополнительно пару внутренних праймеров 3 (5'-CGC TCT ACC AAC TGA GCT A-39') [29] и 5 (5'-TGT ACA CAC CGG CCC GTC-39') [27]. ПЦР проводили в объёме 20 µl в следующем алгоритме: 3 мин при 94 °C, 30 циклов (30 с 94 °C, 40 с 56 °C, 60 с 72 °C) и 2 мин элонгации при 72 °C. Амплифицированные фрагменты оценивали по результатам электрофореза в 1х ТАЕ-буфере в 1% агарозном геле с использованием бромистого этидия. Матрицы очищали набором GFX PCR DNA Gel Band Purification Kit (Amersham Biosciences, USA); секвенировали с использованием ABI Prism BigDye Terminator Cycle Sequencing Ready Reaction Kit (Applied Biosystems, USA) по стандартному протоколу 3100 Avant Genetic Analyzer (Applied Biosystems, USA). Для всех шести штаммов получено по одному амплификату и собрано по одной последовательности локуса, содержащего ген 16SрРНК и межгенный спейсер 16S-23S ITS рРНК.

Полученные нами нуклеотидные последовательности шести штаммов включены во вновь созданные два выравнивания (одно для видов рода *Nodosilinea* и другое – для представителей *Stenomitos* и *Droutiella*) по локусу 16S, выполненные в программе SINA [30]. Предварительный филогенетический анализ выполнен байесовским методом в программе MrBayesPhyML v. 3.0 [31] с использованием модели нуклеотидных замен GTR+I+C и 40 млн генераций.

Результаты и обсуждение

Штамм КРАВГ-3220 морфологически характеризуется нитями с узкими, но иногда бо-

лее заметными прозрачными чехлами; ширина нитей до 3 мкм; характерно образование специфических узлов – нодул, в таких местах ширина нитей достигает 4 мкм (рис. 1а, см. цв. вкладку). Трихомы синезелёные, изогнутые, волнистые, 1,2–1,7 мкм шириной. Клетки на концах трихомов удлинённые 2,1 мкм длиной, в середине более короткие – 1,2 мкм, с перетяжками. Терминальные клетки закруглённые. Деление трихомов с помощью некридных клеток (служат для фрагментации нитей).

Штамм КРАВГ-3983 имеет в основном прямые и изогнутые, но не ломаные иногда волнистые сине-зелёные нити (рис. 1б). Влагалища бесцветные, плохо заметные. Трихомы 1,3–1,5 мкм шириной, клетки, преимущественно удлинённые 2,3–2,7 мкм, до 3 мкм, укороченные клетки редки. Перетяжки небольшие. Наблюдаются включения – иногда по две гранулы в клетке у противоположных стенок.

Для штамма SYKOA-C-002-10 характерны нити тёмно-зелёные до сине-зелёных, трихомы прямые, иногда слегка изогнутые, густо переплетающиеся (рис. 1с). Влагалища тонкие бесцветные, часто в старых частях нитей отсутствуют. Ширина нитей и клеток от 1,6 до 3,4 мкм. Длина варьирует от 1,5 до 3,8 (4) мкм. В клетках есть небольшая гранула, обычно расположена у поперечных перегородок. Перешнуровка у клеточных перегородок выражена, но не всегда хорошо заметна, некридных клеток нет. Конечные клетки закруглённые.

У штамма SYKOA-C-015-09 чехлы отсутствуют или плохо заметны. Нити окрашены в сине-зелёный или тёмно-зелёный (иногда почти чёрный) цвет (рис. 1д). Форма клеток варьирует от почти квадратных до вытянутых, длина от 1,1 до 3,8 мкм. В старых частях дерновинок клетки чаще квадратные. Ширина клеток постоянная 1,4–1,5 (1,8) мкм. Содержимое клеток без грануляций. Трихомы явно перешнурованы. Конечные клетки закруглённые.

Штамм SYKOA-C-003-10 морфологически характеризуется прямыми или изогнутыми бледными сине-зелёными нитями (рис. 1е). Дерновинки рыхлые бледно окрашенные. Слизистые чехлы бесцветные почти незаметные, иногда отсутствуют. Клетки вытянутые, длина всегда больше ширины. Длина варьирует от 2,1 до 3,5 мкм, ширина от 0,9 до 1,1 мкм. Трихомы перешнурованы. Конечные клетки удлинённые и закруглённые на концах.

Изученные штаммы цианопрокариот характеризуются сходными морфологическими признаками (рис. 1) – окраской клеток, наличием тонких слизистых чехлов, перешнуровкой трихомов. Их достоверная идентификация только на основе морфологии невозможна, поэтому потребовалось проведение молекулярно-генетических исследований – секвенирование последовательностей 16S рРНК и 16S-23S ITS.

Построенное на основе анализа последовательностей 16S рРНК филогенетическое дерево (рис. 2) и морфология трихомов свидетельствуют, что штамм КРАВГ-3220 принадлежит к роду *Nodosilinea*, главным отличительным признаком которого является образование нодул. Однозначно отнести штамм к какому-то известному виду невозможно.

Морфология штамма SYKOA-C-003-10 и генетические данные по локусам 16S рРНК (рис. 3) и 16S-23S ITS рРНК, свидетельствуют, что он относится к роду *Stenomitos*, и возможно, является новым видом в данном роде.

Штаммы КРАВГ-3983 и SYKOA-C-015-09 скорее всего, относятся к одному и тому же виду из рода *Stenomitos* (рис. 3). Наибольшую близость они демонстрируют со штаммом *Stenomitos tremulus* UTCC471.

Штамм SYKOA-C-002-10 кластеризуется вместе со штаммами рода *Drouetiella* (рис. 3). Однозначного сходства с каким-либо описанным видом не выявлено, но для установления, что это новый таксон требуются дальнейшие изыскания.

Заключение

Таким образом, для идентификации морфологически трудно различимых штаммов цианопрокариот исключительную важность имеет молекулярно-филогенетические исследования с включением как можно большего числа генов. Это позволит в будущем существенно уточнить не только филогению отдельных таксонов, но и выявить большое число криптических видов и точнее оценить реальное биоразнообразие цианопрокариот в высокоширотных регионах. Морфологическая идентификация без подтверждения молекулярными данными, в ряде случаев, теряет смысл, так как морфологические признаки не всегда проявляются в конкретных экологических условиях. В частности, у представителей рода *Nodosilinea* образование нодул в природных популяциях может не наблюдаться. Географические указания для ряда давно описанных видов принципиально не поддаются вери-

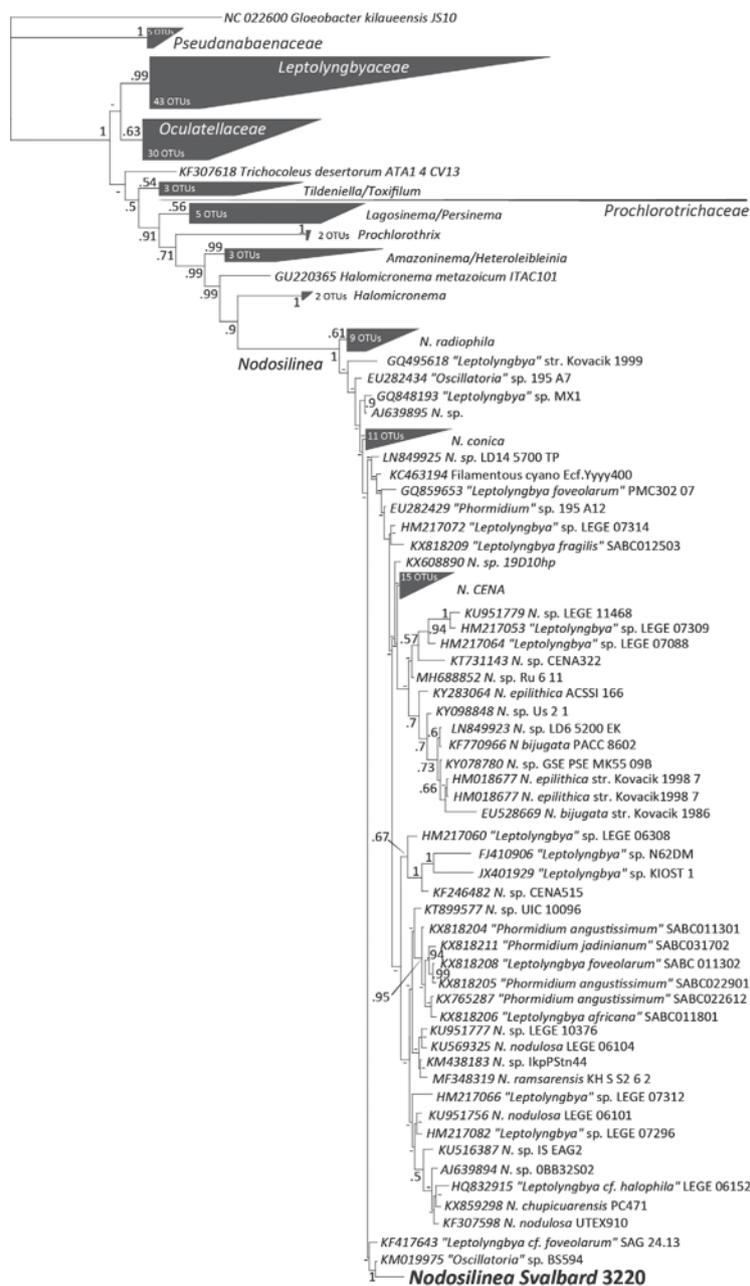


Рис. 2. Филогенетическое дерево рода *Nodosilinea*, построенное на основе Байесовского метода с использованием последовательностей гена 16S рРНК 181 штамма порядка Synechococcales/Gloeobacterales, включая 75 штаммов рода *Nodosilinea*
Fig. 2. 16S rRNA Bayesian phylogeny with a total of 181 sequences from the order Synechococcales/Gloeobacterales, including 75 strains of the *Nodosilinea* genus

фикации на современном уровне и такие указания, по всей видимости, следует исключать из анализа распространения. Развитие секвенирования нового поколения и, особенно, возможность его применения непосредственно в природных популяциях позволит получить гораздо больше адекватной информации.

При поддержке грантов РФФИ № 18-04-00171 и 18-04-00643. Статья опубликована

при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

References

1. Elster J., Lukesova A., Svoboda J., Kopecky J., Kanda H. Diversity and abundance of soil algae in the polar desert, Sverdrup Pass, central Ellesmere Island // Polar Record. 1999. V. 35. P. 231–254. doi: 10.1017/S0032247400015515

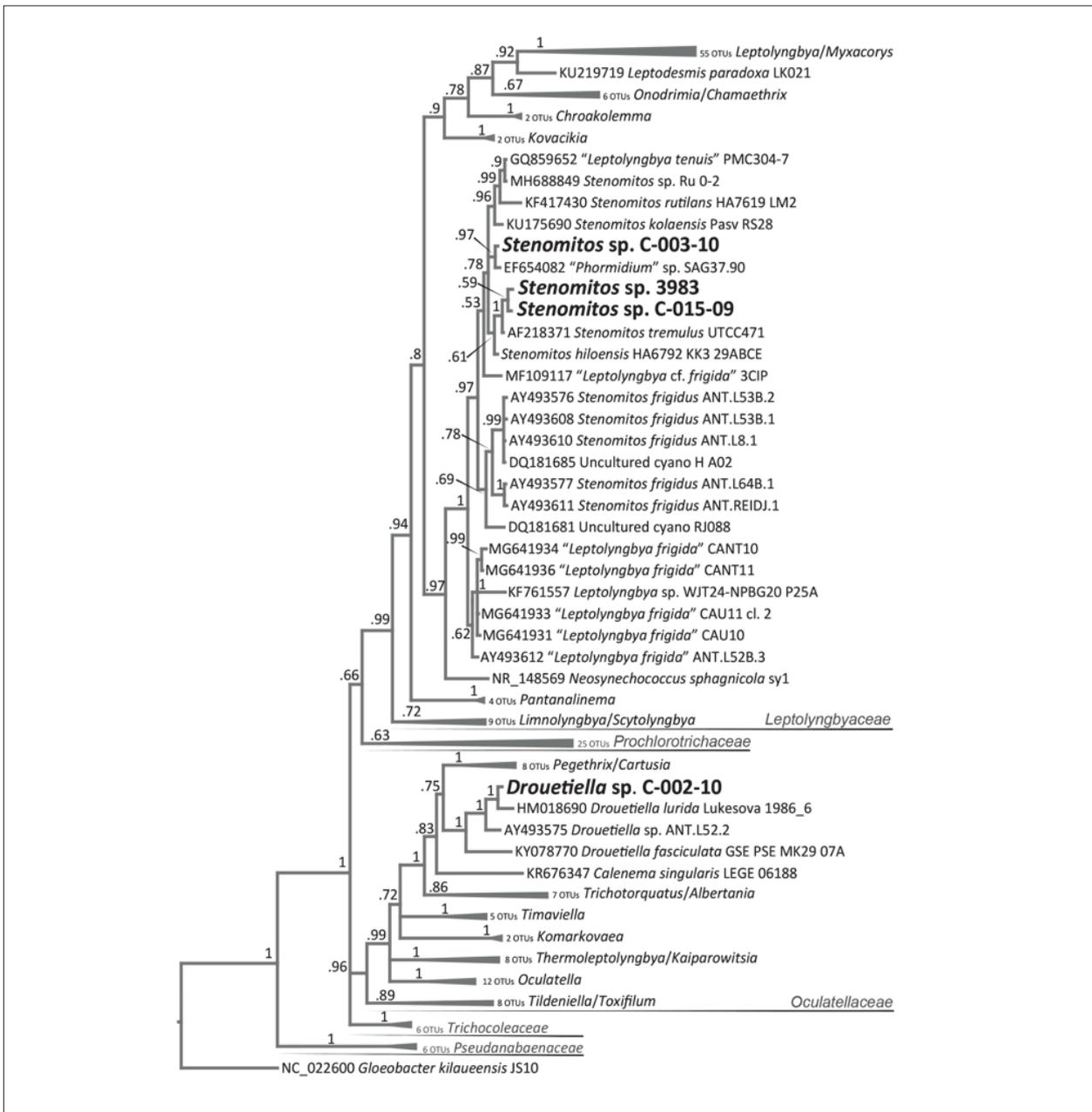


Рис. 3. Филогенетическое дерево цианобактерий рода *Stenomitos* и *Drouetiella*, построенное на основе Байесовского метода с использованием последовательностей гена 16S рРНК 181 штамма порядка Synechococcales/Gloeobacterales

Fig. 3. 16S rRNA Bayesian phylogeny of *Stenomitos* and *Drouetiella* strains with a total of 181 sequences from the order Synechococcales/Gloeobacterales

2. Jungblut A.D., Lovejoy C., Vincent W.F. Global distribution of cyanobacterial ecotypes in the cold biosphere // The ISME Journal. 2010. V. 4. P. 191–202. doi: 10.1038/ismej.2009.113

3. Davydov D. Cyanoprokaryota of the Spitsbergen archipelago: the state of study // Botanicheskiy zhurnal. 2010. V. 95. No. 2. P. 169–176 (in Russian).

4. Konstantinova N.A., Belkina O.A., Davydov D.A., Konoreva L.A., Vilnet A.A. Modern stage and purpose of investigation of liverworts, mosses, lichens, and cyanoprokaryota in the Svalbard // Theoretical and Applied Ecology.

2014. No. 1. P. 26–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-1-026-031

5. Patova E., Davydov D., Andreeva V. Cyanoprokaryotes and algae // Plants and fungi of the polar deserts in the northern hemisphere / Ed. N.V. Matveeva. Sankt-Petersburg: “Marathon”, 2015. P. 133–166.

6. Davydov D. Checklist of cyanobacteria from the European polar desert zone // Botanica. 2018. V. 24. P. 185–201. doi: 10.2478/botlit-2018-0018

7. Davydov D., Patova E. The diversity of Cyanoprokaryota from freshwater and terrestrial habitats in the

- Eurasian Arctic and Hypoarctic // *Hydrobiologia*. 2018. V. 811. No. 1. P. 119–138. doi: 10.1007/s10750-017-3400-3
8. Guiry M.D., Guiry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2019 [Internet resource] <https://www.algaebase.org> (Accessed: 08.11.2019).
9. Dvořák P., Pouličková A., Hašler P., Belli M., Casamatta D.A., Papini A. Species concepts and speciation factors in cyanobacteria, with connection to the problems of diversity and classification // *Biodiversity and Conservation*. 2015. V. 24. P. 739–757. doi: 10.1007/s10531-015-0888-6
10. Boyer S.L., Johansen J.R., Howard G.L. Phylogeny and genetic variance in terrestrial *Microcoleus* (Cyanophyceae) species based on sequence analysis of the 16S rRNA gene and associated 16S-23S ITS region // *Journal of Phycology*. 2002. V. 38. P. 1222–1225. doi: 10.1046/j.1529-8817.2002.01168.x
11. Casamatta D.A., Vis M.L., Sheath R.G. Cryptic species in cyanobacterial systematics: a case study of *Phormidium retzii* (Oscillatoriales) using 16S rDNA and RAPD analyses // *Aquatic Botany*. 2003. V. 77. P. 295–309. doi: 10.1016/j.aquabot.2003.08.005
12. Johansen J.R., Casamatta D.A. Recognizing cyanobacterial diversity through adoption of a new species paradigm // *Algological Studies*. 2005. V. 117. P. 71–93. doi: 10.1127/1864-1318/2005/0117-0071
13. Siegesmund M.A., Johansen J.R., Karsten U., Friedl T. *Coleofasciculus* gen. nov. (Cyanobacteria): morphological and molecular criteria for revision of the genus *Microcoleus* Gomont // *J. Phycol.* 2008. V. 44. P. 1572–1585. doi: 10.1111/j.1529-8817.2008.00604.x
14. Hašler P., Dvořák P., Johansen J.R., Kitner M., Vladan O., Pouličková A. Morphological and molecular study of epipellic filamentous genera *Phormidium*, *Microcoleus* and *Geitlerinema* (Oscillatoriales, Cyanophyta/Cyanobacteria) // *Fottea*. 2012. V. 12. P. 341–356. doi: 10.12697/fce.2019.56.xx
15. Sendall B.C., McGregor G.B. Cryptic diversity within the *Scytonema* complex: Characterization of the paralytic shellfish toxin producer *Heteroscytonema crispum*, and the establishment of the family Heteroscytonemataceae (Cyanobacteria/Nostocales) // *Harmful Algae*. 2018. V. 80. P. 158–170. doi: 10.1016/j.hal.2018.11.002
16. Kim G.H., Klochkova T.A., Kim S.H. Notes on freshwater and terrestrial algae from Ny-Alesund, Svalbard (high Arctic sea area) // *Journal of Environmental Biology*. 2008. V. 29. P. 485–491.
17. Kim G.H., Klochkova T.A., Han J.W., Kang S.-H., Choi H.G., Chung K.W., Kim S.J. Freshwater and terrestrial algae from Ny-Alesund and Blomstrandhalvøya Island (Svalbard) // *Arctic*. 2011. V. 64. P. 25–31. doi: 10.14430/arctic4077
18. Richter D., Matuła J., Pietryka M. Cyanobacteria and algae of selected tundra habitats in the Hornsund fiord area (West Spitsbergen) // *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2009. V. 38. P. 65–70.
19. Komárek J., Kováčik L., Elster J., Komárek O. Cyanobacterial diversity of Petuniabukta, Billefjorden, central Spitsbergen // *Pol. Polar Res*. 2012. V. 33. P. 347–368. doi: 10.2478/v10183-012-0024-1
20. Davydov D. Diversity of the Cyanoprokaryota in polar deserts of Rippfjorden east coast, North-East Land (Nordaustlandet) Island, Spitsbergen // *Algological Studies*. 2013. V. 142. P. 29–44. doi: 10.1127/1864-1318/2013/0082
21. Davydov D. Diversity of the Cyanoprokaryota of the area of settlement Pyramiden, West Spitsbergen Island, Spitsbergen archipelago // *Folia Cryptogamica Estonica*. 2014. V. 51. P. 13–23. doi: 10.12697/fce.2014.51.02
22. Davydov D. Diversity of the Cyanoprokaryota in polar deserts of Innvika cove North-East Land (Nordaustlandet) Island, Spitsbergen // *Czech Polar Reports*. 2016. V. 6. P. 66–79. doi: 10.5817/CPR2016-1-7
23. Davydov D. Cyanoprokaryotes of the west part of Oscar II Land, West Spitsbergen Island, Spitsbergen archipelago // *Czech Polar Reports*. 2017. V. 7. P. 94–108. doi: 10.5817/CPR2017-1-10
24. Pushkareva E., Pessi I.S., Wilmotte A., Elster J. Cyanobacterial community composition in Arctic soil crusts at different stages of development // *FEMS Microbiology Ecology*. 2015. V. 91. fiv143. P. 1–10. doi: 10.1093/femsec/fiv143
25. Melechin A.V., Davydov D.A., Shalygin S.S., Borovichev E.A. Open information system on biodiversity cyanoprokaryotes and lichens CRIS (Cryptogamic Russian Information System) // *Bulleten MOIP. Otdel biologicheskoy*. 2013. V. 118. No. 6. P. 51–56 (in Russian).
26. Melechin A.V., Davydov D.A., Borovichev E.A., Shalygin S.S., Konstantinova N.A. CRIS – service for input, storage and analysis of the biodiversity data of the cryptogams // *Folia Cryptogamica Estonica*. 2019. V. 56. P. 99–108. doi: 10.12697/fce.2019.56.10
27. Wilmotte A., Van Der Auwera C., De Wachter R. Structure of the 16S ribosomal RNA of the thermophilic cyanobacteria *Chlorogloeopsis* HTF (*Mastigocladus laminosus* HTF) strain PCC7518, and phylogenetic analysis // *FEBS Lett*. 1993. V. 317. P. 96–100. doi: 10.1016/0014-5793(93)81499-p
28. Nuebel U., Garcia-Pichel F., Muyzer G. PCR primers to amplify 16S rRNA genes from cyanobacteria // *Appl. Environ. Microbiol.* 1997. V. 63. P. 3327–3332.
29. Wilmotte A. Molecular evolution and taxonomy of the cyanobacteria // *The molecular biology of cyanobacteria* / Ed. D.A. Bryant. Dordrecht: Kluwer, 1994. P. 1–25.
30. Pruesse E., Peplies J., Glöckner F.O. SINA: Accurate high-throughput multiple sequence alignment of ribosomal RNA genes // *Bioinformatics*. 2012. V. 28. P. 1823–1829. doi: 10.1093/bioinformatics/bts252
31. Guindon S., Dufayard J.F., Lefort V., Anisimova M., Hordijk W., Gascuel O. New algorithms and methods to estimate maximum-likelihood phylogenies: assessing the performance of PhyML 3.0 // *Systematic Biology*. 2010. V. 59. P. 307–321. doi: 10.1093/sysbio/syq010

Ассоциации азотфиксирующих цианобактерий со сфагновыми мхами в пойменном болоте средней тайги (Европейский Северо-Восток)

© 2020. Е. Н. Патова, к. б. н., в. н. с., М. Д. Сивков, ведущий инженер,
Н. Н. Гончарова, к. б. н., н. с., Т. П. Шубина, к. б. н., учёный секретарь,
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: patova@ib.komisc.ru

В результате проведённых исследований получены новые научные знания о разнообразии и структуре цианопрокариот и сфагновых мхов в бриофитных ассоциациях пойменных переходных болот бореальной зоны Европейского Севера. Выявлено десять видов diazotrophic цианопрокариот. Впервые выделены доминантные комплексы diazotrophic цианобактерий, ассоциированных со сфагновыми мхами: *Nostoc paludosum*, *Microchaete tenera*, *Anabaena verrucosa*, *Hapalosiphon pumilus*. Изучены количественные характеристики азотфиксирующих цианопрокариот в эпифитных группировках сфагновых мхов, отмечено от 20 до 350 тыс. колоний на 1 дм³ моховой дернины. Отмечены сезонные изменения количественных показателей цианопрокариот. Впервые изучена суточная и сезонная динамика азотфиксации цианопрокариот бриофитных ассоциаций для пойменного переходного типа болот. Максимальные величины скоростей нитрогеназной активности были отмечены для самого тёплого месяца (июль) в диапазоне от 0,78 до 2,12 мг C₂H₄/(м²·ч). Выявлена зависимость процесса азотфиксации от температуры и на её основе рассчитана азотфиксирующая активность ассоциаций цианопрокариот со сфагновыми мхами за вегетационный период (156 дней), которая составила 1,28–3,02 г C₂H₄/м², или в пересчёте на азот 1,51–3,50 г N/м². Результаты соизмеримы с азотфиксирующей активностью сообществ цианопрокариот в моховом покрове лесных экосистем бореальной зоны.

Ключевые слова: ассоциация цианобактерий и сфагнумов, азотфиксация, пойменные болота, Европейский Север.

Associations between nitrogen-fixing cyanobacteria and sphagnum mosses in floodplain bogs of the middle taiga (European Northeast)

© 2020. E. N. Patova ORCID: 0000-0002-9418-1601, M. D. Sivkov ORCID: 0000-0003-4914-0234,
N. N. Goncharova ORCID: 0000-0002-8177-2883, T. P. Shubina ORCID: 0000-0001-6166-7325,
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: patova@ib.komisc.ru

The moss cover is an edicator of terrestrial communities in boreal zones. It affects many key processes involved in matter and energy transportation. The associations between mosses and N₂-fixing cyanobacteria influence the balance of N and C in the northern latitudes. It is predicted that climate change will lead to structural and functional rearrangements in the associations between cyanobacteria and bryophytes which will result in increased rates of N. The most widespread bryophyte associations with cyanoprokaryotes are found in bogs. They have an impact on the Earth's climate. In turn, climate change causes significant structural and functional reorganization of bogs ecosystems. The described relationship makes it necessary to do comprehensive analysis of bog ecosystems at expected or observed climatic changes. The obtained data could help to forecast changes in C and N pools. The aim of the investigation was to seasonal observations composition, structure and N₂-fixing activity of cyanobacteria in bryophyte complexes in taiga bogs. We were conduct field and laboratory studies (in May–October 2018) on daily and seasonal N₂-fixing activity (using the acetylene reduction method) which occur in associations between Sphagnum mosses and cyanobacteria in various types of the floodplain bogs. The basis of epiphytic groups on Sphagnum mosses is formed by cyanobacteria N₂-fixing: *Nostoc paludosum*, *Microchaete tenera*, *Anabaena verrucosa*, *Hapalosiphon pumilus*. The quantitative characteristics of cyanobacteria in the epiphytic groups of Sphagnum mosses from 20 to 350 thousand colonies per dm² of moss cover were noted. Seasonal changes in the quantitative indices of cyanobacteria were revealed. The maximum rates of nitrogenase activity were noted for the warmest month (July) in the range 0.78 to 2.12 mg C₂H₄/(m²·h). The dependence of the N₂-fixing process on temperature was studied, and on its basis, nitrogen-fixing activity were calculated for the growing period (156 days): 1.28–3.02 g C₂H₄/m², or 1.51–3.50 g N/m².

Keywords: associations of cyanobacteria and sphagnum mosses, nitrogen fixation, floodplain swamps, European North.

Суанпрокариота/Суанобактерия фиксируют из атмосферы не только углерод, но и молекулярный азот, что определяет их особое место в структурно-функциональной организации экосистем различных природных регионов. Сфагновые мхи являются пространственно доминирующими видами северных болот, создают благоприятную среду для обитания цианобактерий (ЦБ) и оптимальные условия для протекания процесса азотфиксации [1–3]. Цианобактерии, ассоциированные со сфагновыми мхами, могут способствовать внесению азота в торфяные залежи болотных комплексов [4, 5], воздействуют на рост сфагнумов, следовательно, оказывают влияние на динамику углерода в болотных экосистемах [1, 6]. Ассоциации между ЦБ и сфагновыми мхами могут оказывать влияние на процессы, связанные с поглощением парниковых газов из атмосферы. При изучении ЦБ, ассоциированных со сфагновыми мхами, их идентификация приведена в большинстве случаев лишь на родовом уровне [7]. Определение видового разнообразия и количественных показателей ЦБ, ассоциированных со сфагновыми мхами, изучение их сезонной азотфиксирующей активности необходимы для оценки вклада этой группы микроорганизмов в процесс накопления молекулярного азота для разных типов бореальных болот.

Цель работы – изучение состава, структуры и азотфиксирующей активности ЦБ бриофитных комплексов в сфагновом покрове пойменного болота в подзоне средней тайги, оценка их роли в накоплении азота.

Объекты и методы

Исследования проведены в мае–октябре 2018 г. в таёжной зоне Республики Коми. Для выбора экспериментального болотного комплекса были применены ГИС-технологии с привлечением программы SAS Planet. Используются космические снимки района исследований в бас. Вычегды (бас. Белого моря) в период летней межени (рис. 1, а, см. цв. вкладку). Для исследований выбран вариант наиболее распространённого типа болот – переходное болото с минеротрофным питанием (61°33' с. ш., 50°46' в. д.). Рассчитана площадь пойменных переходных болот, для района исследований она составляет около 123 га, в среднем на 1 км реки приходится 2,67 га пойменных болот. Средняя мощность торфяной толщи на исследованном участке достигала 1–2 м. Под торфом находится вода, поэтому болотные

воды находятся постоянно на высоком уровне. Показатель кислотности pH болотных вод за время наблюдений находился в диапазоне 4,40–4,80, торфа – 4,45–4,68 единиц.

Изучено видовое разнообразие цианопрокариот, ассоциированных со *Sphagnum riparium* Ångstr. и *S. angustifolium* (С.Е.О. Jensenex Russow). Проведены полевые исследования суточной нитрогеназной активности сфагновых мхов с высоким обилием эпифитных гетероцитных ЦБ. Видовое разнообразие азотфиксирующих ЦБ определяли по морфологическим характеристикам с учётом номенклатурных преобразований [8], использованы микроскопы Nikon (Eclips 80i и 400FL). Количественный учёт ЦБ проведён в счётной камере на основе расчёта соотношения числа особей (нитей и колоний) на единицу площади моховой дернины. Для количественного учёта выполняли смывы ЦБ с поверхности 5 побегов зелёной части сфагнумов в 5 повторностях в 10 мл воды. Из этого объёма отбирали 1 мл для подсчёта колоний. Расчёт проведён на общее количество побегов сфагнумов в единице площади (дм²). К доминантам отнесены виды ЦБ, которые отмечены во всех полях зрения счётной камеры.

Температуру мохового покрова измеряли автономными логгерами DS 1922L на глубинах 1, 5, 10 см. Интервал измерений датчиков составлял 1 ч. Для измерения влажности воздуха в моховом слое применяли датчики влажности DS 1923. Уровень болотных вод (УБВ) измеряли в пластмассовой трубке диаметром 30 мм. Влажность воздуха и фотосинтетически активную радиацию (ФАР) регистрировали на высоте 20 см от мохового покрова с помощью микростанции климата HOBO 21-002 (США) с датчиком ФАР S-LIA-M003. Для расчёта поступления в болото азота (N) с атмосферными осадками были отобраны образцы снега (ноябрь–март, 117 суток). Содержание соединений азота проанализировано в аналитической лаборатории Института биологии методом термодаталитического окисления с хемилюминесцентным детектированием на анализаторе ТОС (Shimadzu). Содержание соединений азота в осадках составило 0,27 г/(м²·год).

Измерения азотфиксации/нитрогеназной активности (НА) проводили методом ацетиленовой редукции [9] в течение всего вегетационного сезона с момента схода снега (11 мая) и до установления снежного покрова (18 октября) не реже 1 раза в неделю. Активность НА рассчитана как продукция C₂H₄ в мг/(м²·ч).

Е. Н. Патова, М. Д. Сивков, Н. Н. Гончарова, Т. П. Шубина
«Ассоциации азотфиксирующих цианобактерий
со сфагновыми мхами в пойменном болоте средней тайги
(Европейский Северо-Восток)», С. 117

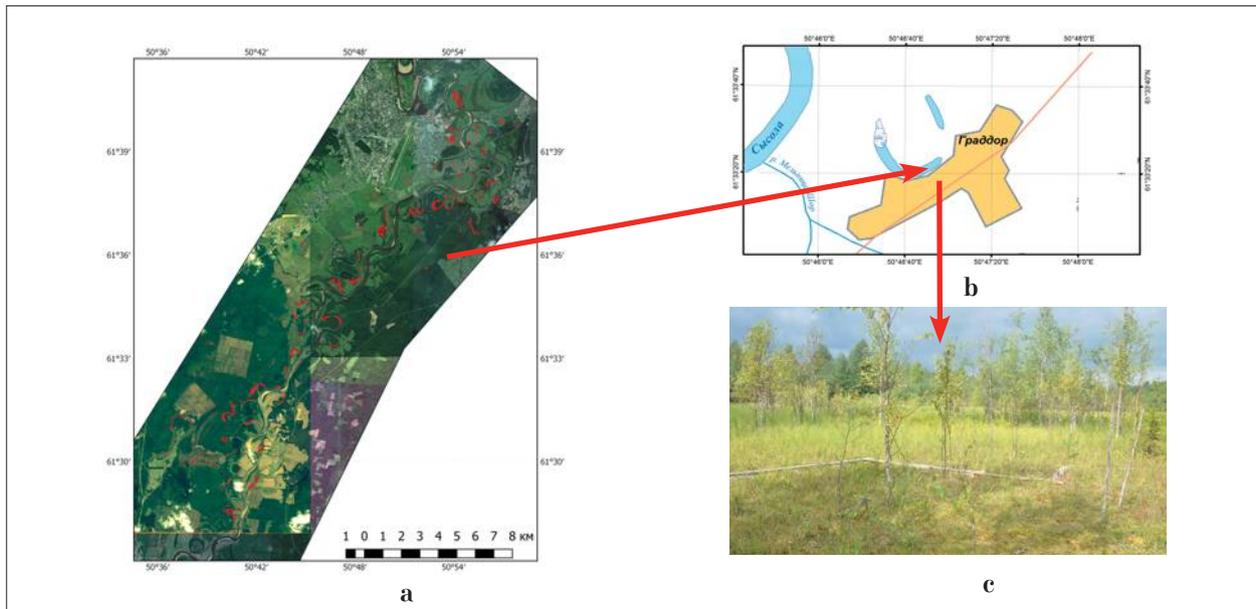


Рис. 1. Космический снимок района исследований в бас. р. Вычегда (а), объект исследований – болото (b, c). Красным цветом выделены пойменные болота
Fig. 1. Satellite image of the research area in Vychegda River basin (a), the object of research is the floodplain bog (b, c). Floodplain bogs are highlighted in red

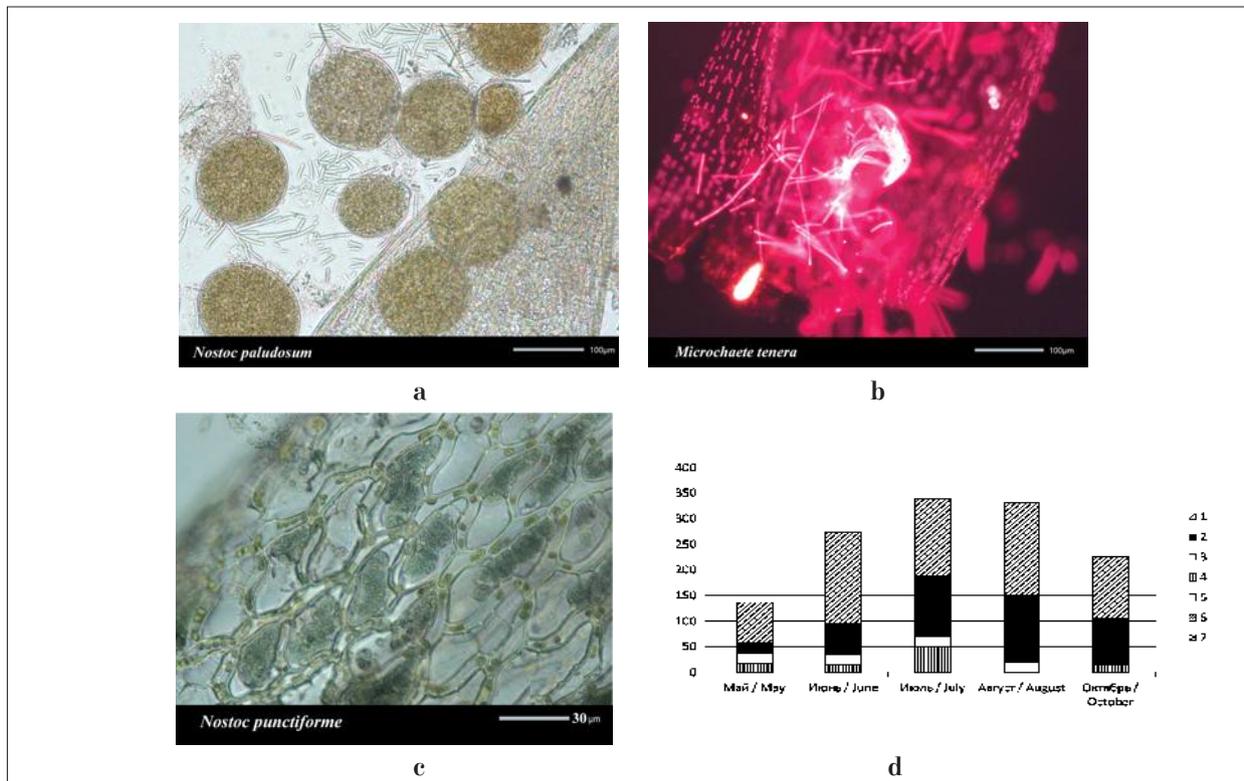


Рис. 2. ЦБ доминирующие в ассоциациях сфагнумов (а–с), сезонная динамика разнообразия и количественных показателей ЦБ (тыс. колоний/нитей на dm^2 моховой дернины) в период вегетации (d): 1–7 – виды: 1 – *Microchaete tenera*, 2 – *Nostoc paludosum*, 3 – *Anabaena verrucosa*, 4 – *N. punctiforme*, 5 – *N. kihlmanii*, 6 – *A. oscillarioides*, 7 – *Fischerella ambigua*
Fig. 2. Nitrogen fixing species dominating in associations of sphagnum (a–c), seasonal dynamics of diversity and quantitative indicators of cyanobacteria (colonies/strands per dm^2 of moss turf) during the growing season (d): 1–7 – species: 1 – *Microchaete tenera*, 2 – *Nostoc paludosum*, 3 – *Anabaena verrucosa*, 4 – *N. punctiforme*, 5 – *N. kihlmanii*, 6 – *A. oscillarioides*, 7 – *Fischerella ambigua*

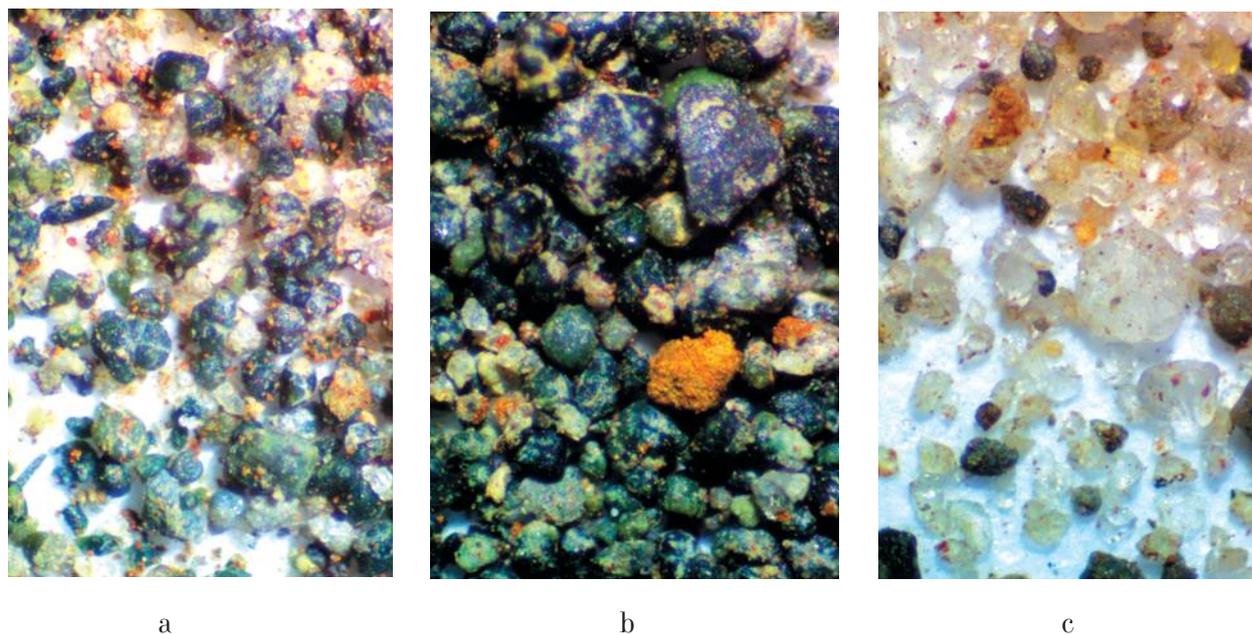


Рис. 1. Микрофотографии образцов, сделанные с помощью стереоскопического микроскопа МСП-1 вариант 22 (увеличение x20): а – эфель; б – магнитная фракция эфеля; с – немагнитная фракция эфеля
Fig. 1. Microphotographs of samples taken using a stereoscopic microscope MSP-1 option 22 (magnification x20): a – ephel; b is the magnetic fraction of the ephel; c – non-magnetic fraction of the ephel

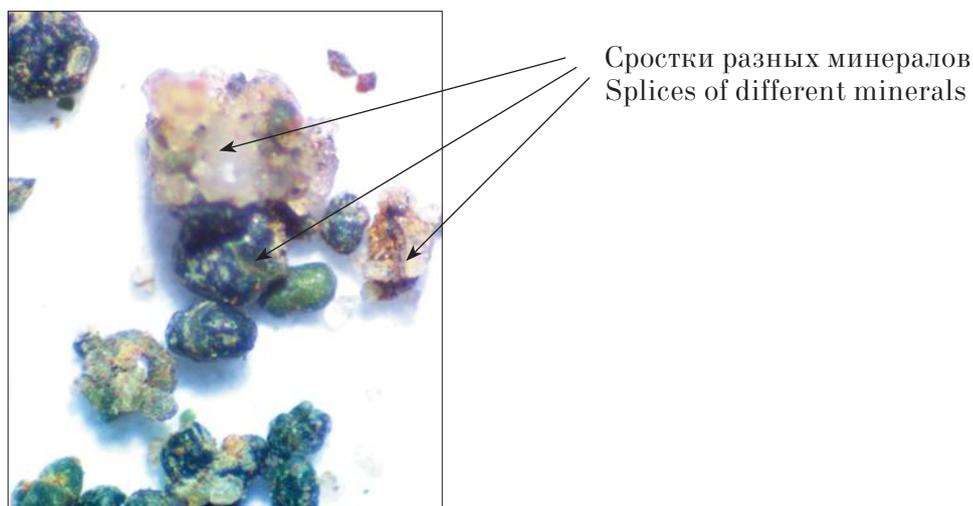


Рис. 2. Микрофотография сростков разных минералов, входящих в состав эфеля, сделанная с помощью стереоскопического микроскопа МСП-1 вариант 22 (увеличение x20)
Fig. 2. A microphotograph of the intergrowths of various minerals that make up the ephel, made using a stereoscopic microscope MSP-1 option 22 (magnification x20)

Результаты и обсуждение

Анализ этилена выполняли в день отбора проб на газовом хроматографе Цвет-800 (Россия) с пламенно-ионизационным детектором. При калибровке хроматографа использовали стандартные газовые смеси 5,0 и 48,0 ppm C₂H₄ (ЛиндеГазРус, Россия) с абсолютными погрешностями ±4%.

Для выявления функциональной зависимости NA от температуры использовали регрессионный анализ. Поиск наилучшей регрессионной модели выполняли оценкой значимости эмпирических коэффициентов регрессий и свободных членов. Для выявления факторов среды, оказывающих наиболее значимое влияние на NA ЦБ исследованного болота использован корреляционный анализ Спирмена. Показатели NA оценивали, используя температурные модели и данные измерений температуры в слое 0–1 см мохового покрова. Коэффициенты и критерии считали статистически значимыми при $p < 0,05$. В таблицах приведены арифметические значения и стандартные ошибки средних трёх и более измерений. Анализ выполнен в Statistica 6.0 (StatSoft, США).

В изученном пойменном болоте, как и в других типах болотных экосистем [7], выявлено невысокое разнообразие ЦБ в моховых ассоциациях. При этом данный тип болот отличается значительное обилие азотфиксирующих ЦБ в сфагновом покрове. ЦБ обитают на поверхности веточек сфагнумов, в пазухах листьев и в межклеточном пространстве (рис. 2, а–с, см. цв. вкладку). За весь период наблюдений на исследованном болоте выявлено 9 видов. Основу формируют гетероцитные ЦБ *Nostoc paludosum* Kütz. ex Born. et Flah., *N. punctiforme* (Kütz. ex Hariot) Hariot, *Microchaete tenera* Thuret ex Born. et Flah., *Anabaena verrucosa* B.-Petersen, *Hapalosiphon pumilus* Kirch. ex Born. et Flah. Эти виды отмечены во всех исследованных пробах на протяжении всего вегетационного периода с ранней весны до поздней осени. В сфагновых ассоциациях отмечено от 116 тыс. до 350 тыс. колоний азотфиксаторов на площади 1 дм² сфагновой дернины (рис. 2, d), доминируют ЦБ *Microchaete*

Таблица 1 / Table 1

Климатические показатели и нитрогеназная активность (NA) ассоциированных со сфагновыми мхами ЦБ для пойменного болота за вегетационный сезон / Climatic indicators and nitrogenase activity of cyanobacteria associated with sphagnum mosses for the floodplain bog during the growing season

Период наблюдений Observation period	Осадки Precipitation	Средняя / Average		УБВ / LSW	WC	NA
		T °C	ФАР PAR			
11.05–27.05	23,7	11,1	400	$\frac{-4,4}{-10,9}$	$\frac{1115}{1040}$	$\frac{1,09}{0,07}$
28.05–13.06	87,0	7,9	285	$\frac{-5,8}{-11,7}$	$\frac{1070}{1060}$	$\frac{0,35}{0,43}$
14.06–16.07	105	18,5	440	$\frac{-6,2}{-15,6}$	$\frac{910}{990}$	$\frac{2,12}{0,70}$
17.07–05.08	0,0	19,1	480	$\frac{-7,0}{-15,8}$	$\frac{860}{1150}$	$\frac{0,85}{0,78}$
06.08–29.08	51,2	14,1	287	$\frac{-7,1}{-13,6}$	$\frac{830}{860}$	$\frac{1,70}{0,65}$
30.08–11.09	1,0	10,6	244	$\frac{-7,4}{-13,0}$	$\frac{885}{970}$	$\frac{0,25}{0,38}$
12.09–26.09	50,7	9,3	136	$\frac{-6,2}{-12,9}$	$\frac{925}{1085}$	$\frac{0,60}{0,13}$
06.10–18.10	23,6	2,4	63	$\frac{-4,6}{-11,1}$	$\frac{990}{1060}$	$\frac{0,04}{0,01}$

Примечания: Осадки – сумма (мм); T °C, ФАР – средние значения в период наблюдений температуры поверхности моховой дернины (°C) и фотосинтетически активной радиации (ммоль/(м² · с)); УБВ – уровень болотных вод (см) в момент измерения; WC – влажность мхов (%), NA – нитрогеназная активность (мг C₂H₄/(м² · ч)) в конце периода наблюдений. В числителе показатели для участков с доминированием *S. riparium*, в знаменателе – с *S. angustifolium*.

Notes: Precipitation – the amount (mm) during the observation period; T °C, PAR – average values during the observation of the temperature of the moss (°C) and photosynthetically active radiation (mmol/(m² · s)); LSW – the level of swamp water (cm) at the time of measurement; WC – moss moisture (%), NA – nitrogenase activity (mg C₂H₄/(m² · h)) at the end of the observation period. In the numerator, indicators for *S. riparium*, in the denominator – with *S. angustifolium*.

Таблица 2 / Table 2

Корреляционная таблица взаимосвязи нитрогеназной активности (NA) с факторами среды
The correlation table of the relationship of nitrogenase activity with environmental factors

Показатели / Indicators		<i>n</i>	<i>R</i>	<i>p</i>
NA	$T_{изм} / T_{meas}$	54	0,84	< 0,0001
NA	WC	37	-0,19	0,291
NA	T_1	54	0,73	0,0001
NA	$\PhiАР_{cp} / PAR_{av}$	54	0,401	0,041

Примечания: $T_{изм}$ °C – температура мха в момент измерения, WC – полевая влажность мхов, T_1 °C, $\PhiАР_{cp}$ – среднесуточные температура мохового покрова и фотосинтетически активной радиации в предшествующие измерениям сутки, *n* – количество измерений, *R* – коэффициент корреляции, *p* – уровень значимости.

Notes: T_{meas} °C – moss temperature at the moment of measuring, WC – field humidity of mosses, T_1 °C, PAR_{av} – average daily temperature of moss cover and photosynthetically active radiation in the previous days, *n* – number of measurements, *R* – correlation coefficient, *p* – significance level.

tenera, *N. paludosum* и *N. punctiforme*. Абсолютным доминантом по обилию на мхах является *N. paludosum*. Реже и не во всех пробах встречаются гетероцитные виды *Fischerella ambigua* (Näg.) Gom., *Anabaena augstumalis* Schmidle, *A. oscillarioides* BoryexBorn. & Flah., *N. kihlmanii* Lemm. Наблюдения за распределением ЦБ на стеблях сфагнов показали, что поселяются они в основном в верхней вегетирующей части мхов.

Многочисленными исследованиями на примере биологических почвенных корочек с доминированием ЦБ было показано, что сезонность, как составная последовательность различных факторов, таких как температура, свет и влажность, определяет основную динамику фиксации азота у ЦБ [10–12]. Авторы отмечают, что важно учитывать эти факторы, как в момент измерений, так и в предшествующий период, до нескольких суток до начала измерений. Для процесса NA значимость вышеперечисленных факторов иерархична и определяется, экологическими условиями местообитания ЦБ.

Результаты измерений экологических параметров и величин NA приведены в таблице 1. Оценено влияние на NA температуры мха в момент измерения ($T_{изм}$) и полевой влажности мхов (WC), среднесуточных значений температуры мохового покрова на глубине 1 см (T_1) и фотосинтетически активной радиации ($\PhiАР_{cp}$) за предшествующие измерениям 2 дня (табл. 2). Корреляционный анализ выявил высокую статистически достоверную связь NA с $T_{изм}$ ($R = 0,84, p < 0,0001$) (табл. 2). Сильная связь NA отмечена также со среднесуточной температурой T_1 ($R = 0,73, p = 0,0001$). Кроме того, суточные измерения показали значительное влияние ($R = 0,98$) $T_{изм}$ на азотфиксацию ЦБ.

Исследования показали, что NA у ЦБ бриофитных ассоциаций на пойменном болоте на-

блюдается в течение всего вегетационного сезона. Как и ожидалось, максимальные скорости NA отмечали в период значительных осадков и оптимальных температур в начале июля (табл. 2). Результаты максимальных скоростей NA измеренные в сезоне и расчётные сезонные величины представлены в таблице 3.

Для пойменного болота в период проведения измерений наблюдали благоприятное сочетание экологических факторов, оказывающих влияние на NA. Сезонные наблюдения показали, что влажность моховой дернины на исследованном болоте регулируется не атмосферными осадками, а постоянно высоким УБВ на протяжении всего вегетационного сезона (табл. 1). Это обусловлено особенностью гидрологического режима пойменного болота. В результате влажность сфагнумов была постоянно высокой, и этот фактор не был лимитирующим для процесса азотфиксации для исследованного типа болот. Свет также в течение большей части вегетационного периода не относится к ограничивающим факторам для NA вследствие сильно удлинённого светового дня в северных широтах. В течение большей части вегетационного сезона уровень $\PhiАР$ в верхней части моховой дернины был достаточен для обеспечения фотосинтеза и поддержания NA на оптимальном уровне (табл. 1). Из всех исследованных факторов среды сезонный ход NA больше всего согласуется с сезонным ходом температуры. Как показал статистический анализ, определяющим фактором скоростей азотфиксации ЦБ, ассоциированных со сфагновыми мхами в исследованном пойменном болоте, является температура моховой дернины в момент измерений – $T_{изм}$ °C ($R = 0,88, p < 0,0001$). Воздействие на скорости NA оказывает также температура мохового покрова (T_1 °C) в предшествующий измерениям день ($R = 0,73, p < 0,0001$). Это связано с влиянием

предшествующих температурных условий на фотосинтез ЦБ, в процессе которого они запасают продукты ассимиляции органического вещества, необходимые для энергетического обеспечения процесса НА [10]. На приоритетное значение температуры для процесса азотфиксации в северных регионах указывают многие исследователи [10–12].

Сравнить масштабы НА для пойменного болота в подзоне средней тайги с аналогичными типами болот на Европейском Севере не удалось. Но полученные результаты накопления азота для пойменного болота сопоставимы с результатами для ассоциаций ЦБ со сфагновыми мхами в других арктических и субарктических болотах. За период наблюдений максимальные скорости НА моховой дернины с доминированием *S. riparium* и

S. angustifolium достигали 5,86 и 2,85 мкг $C_2H_4/(г_{сух.в} \cdot ч)$ соответственно (табл. 3). Наши данные по скорости НА у ЦБ, ассоциированных со *S. riparium*, близки с результатами в 138 нмоль $C_2H_4/(г_{сух.в} \cdot ч)$ (3,86 мкг $C_2H_4/(г_{сух.в} \cdot ч)$), полученным для ЦБ ассоциаций этого же вида мха из болот субарктической зоны Швеции [6].

Среднесуточные величины НА для ассоциаций ЦБ с зелёными мхами в бореальных лесах Скандинавии достигают до 460 мкмоль $C_2H_4/(м^2 \cdot сут)$ [13], её авторы отмечают как высокую. Для пойменного болота среднесуточная величина НА для ЦБ в ассоциациях сфагновых мхов была значительно выше и достигала в июле до 1424 мкмоль $C_2H_4/(м^2 \cdot сут)$.

Сравнение сезонных результатов накопления азота в моховом покрове исследованного болота с сезонными и годовыми показа-

Таблица 3 / Table 3

Функциональные показатели цианобактерий, ассоциированных со сфагновыми мхами, для пойменного болота / Functional indicators of cyanobacteria associated with *Sphagnum* mosses for flood plain swamp

Показатель Indicator	Единица измерения Unit of measurement	Диапазон значений Value range
NA _{макс} / NA _{max}	мг $C_2H_4/(м^2 \cdot ч)$ / mg $C_2H_4/(м^2 \cdot h)$	0,78–2,12
	мкг $C_2H_4/(г_{сух.в} \cdot ч)$ / μg $C_2H_4/(g_{dry} \cdot h)$	2,85–5,86
NA _{сут} / NA _{day}	мг $C_2H_4/(м^2 \cdot сут)$ / mg $C_2H_4/(м^2 \cdot d)$	202–1424
	мкмоль $C_2H_4/(г \cdot сут)$ / μmol $C_2H_4/(g \cdot d)$	0,55–4,06
NA _{сезон} / NA _{season}	г $C_2H_4/(м^2 \cdot сезон)$ / g $C_2H_4/(м^2 \cdot season)$	1,28–3,02

Примечание: максимальные в сезоне удельные скорости (NA_{макс}) и суточные значения (NA_{сут}) нитрогеназной активности цианобактерий, сезонные значения нитрогеназной активности (NA_{сезон}).

Note: the maximum specific velocities in the season (NA_{max}) and daily values (NA_{day}) of the nitrogenase activity of cyanobacteria, seasonal values of nitrogenase activity (NA_{season}).

Таблица 4 / Table 4

Сезонные показатели нитрогеназной активности (НА) для ЦБ в ассоциациях со сфагнумами в северных заболоченных местообитаниях / Seasonal indicators of nitrogen fixation of associations of cyanobacteria with *Sphagnum* in the northern wetland habitats

Район исследований Research area	Тип сообществ Community	Сезонные показатели Seasonal indicators	Литературный источник Literary source
Канадская Арктика Canadian Arctic	Тундровые болота Tundra bogs, <i>Sphagnum</i> spp.	1,87–2,46 г N/(м ² · год) (за 103 дня) 20,5 кг N/(га · год) 1.87–2.46 g N/m ² · y (for 103 days) 20.5 kg N/(ha · y)	[14]
Шведская Лапландия Swedish Lapland	Минеротрофные болота Minerotrophic swamps, <i>S. riparium</i>	0.1–6.4 г N/(м ² · год) 0.1–6.4 g N/(m ² · y)	[16]
Север Финляндии Northern Finland	Торфяные болота Peatland stages, <i>Sphagnum</i> spp.	0.1–2.9 г N/(м ² · год) 0.1–2.9 g N/(m ² · y)	[15]
Северо-Восток России Northeast Russia	Пойменное болото Floodplain swamps, <i>Sphagnum</i> spp.	1.51–3.50 г N/(м ² · год) (за 156 дней сезона) 1.51–3.50 g N/(m ² · y) (for 156 days)	данная публикация this publication

телями в других северных регионах приведено в таблице 4. Сезонную НА рассчитывали с использованием конверсионного показателя, равного 0,85, который получен для ассоциаций сфагновых мхов и ЦБ болот Канадской Арктики с использованием $^{15}\text{N}_2$ [14]. С таким конверсионным показателем сезонные значения азотфиксации ЦБ (табл. 3) в пересчёте на N для моховых сообществ пойменного болота составят 1,51–3,50 г N/м² (табл. 4). При этом максимальные величины сезонной НА для пойменного болота выше, чем сезонная НА сфагновых мхов арктических заболоченных лугов [14]. Это объяснимо более южной локализацией нашего района исследований и более продолжительным вегетационным сезоном (156 суток в отличие от 103). Сезонные величины НА исследованного болота сопоставимы с годовыми значениями, полученными для ассоциаций ЦБ мхов в торфяниках Финляндии [15] и минеротрофных болот Шведской Лапландии [16] (табл. 4).

В оценке региональных величин накопления N обычно используют величины, рассчитанные на 1 гектар. Например, для тундровых болот Канады фиксация азота ЦБ, связанными со сфагнунами, составляет 20,5 кг N/(га · год) [14], это существенно выше его поступления с осадками оцениваемое 0,39 кг N/(г · год) [14]. В субарктике в болотах Швеции величины выше и достигают до 90 кг N/(га · год), что также превышает поступление N в экосистемы с осадками 2,2 кг N/(га · год) [17]. Для исследованного пойменного болота сезонные показатели НА в пересчёте на гектар составляют около 15–35 кг N/(га · год), а поступление азота с осадками около 2,7 кг/(га · год).

Заключение

В исследованном пойменном болоте в ассоциациях со сфагновыми мхами отмечено 9 видов diaзотрофных ЦБ. Доминанты сообществ – *Microchaete tenera*, *Nostoc paludosum* и *N. punctiforme*. Для исследованных ассоциаций отмечена высокая азотфиксирующая активность. Выявлена статистически значимая зависимость процесса НА от температуры мохового покрова. Количество фиксированного ЦБ азота значительно выше его атмосферного осаждения. Результаты позволяют говорить о существенном вкладе эпифитных ЦБ сфагновых мхов в фиксацию азота в пойменных болотах таёжной зоны на Европейском Северо-Востоке. Фиксированный

ЦБ азот аккумулируется в сфагновых мхах, стимулируя их рост и накопление биомассы, что в конечном итоге оказывает влияние на накопление органического вещества и динамику углерода в экосистеме болот [6]. Полученные результаты могут быть использованы для расчётов не только сезонной азотфиксирующей активности ЦБ, но и динамики N и C в пойменных болотах подзоны средней тайги в условиях климатических изменений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-04-00643. Статья опубликована при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

References

1. Lindo Z., Nilsson M.C., Gundale M.J. Bryophyte-cyanobacteria associations as regulators of the northern latitude Biogeochemistry carbon balance in response to global change // *Global Change Biol.* 2013. V. 19. P. 2022–2035. doi: 10.1111/gcb.12175
2. Dickson L.G. Constraints to nitrogen fixation by cryptogamic crusts in a polar desert ecosystem, Devon Island, N. W. T., Canada // *Arct. Antarct. Alp. Res.* 2000. V. 32. P. 40–45.
3. Basilier K. Fixation and uptake of nitrogen in sphagnum blue-green-algal associations // *Oikos.* 1980. No. 34. P. 239–242.
4. Gavazov K.S., Soudzilovskaia N.A., Logtestijn R.S., Braster M., Cornelissen J.H. Isotopic analysis of cyanobacterial nitrogen fixation associated with subarctic lichen and bryophyte species // *Plant and Soil.* 2010. No. 333 (1–2). P. 507–517.
5. Elzen E., Berg L., Weijden B., Fritz K., Sheppard L., Lamers L. Effects of airborne ammonium and nitrate pollution strongly differ in peat bogs, but symbiotic nitrogen fixation remains unaffected // *Science of the Total Environment.* 2018. V. 610–611. P. 732–740. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.102
6. Berg A., Danielsson A., Svensson B.H. Transfer of fixed-N from N₂-fixing cyanobacteria associated with the moss *Sphagnum riparium* results in enhanced growth of the moss // *Plant Soil.* 2013. V. 362. P. 271–278. doi: 10.1007/s11104-012-1278-4
7. Solheim B., Zielke M. Associations between cyanobacteria and mosses / *Cyanobacteria in symbiosis* / Eds. A.N. Rai, B. Bergman, U. Rasmussen. Kluwer, Dordrecht, 2002. P. 137–152.
8. Komárek J. Cyanoprokaryota III: Nostocales, Stigonematales // *Süßwasserflora von Mitteleuropa.* V. 19/3: Cyanoprokaryota. Springer-Verlag, Berlin, 2013. 548 p.
9. Stewart W.D., Fitzgerald G.P., Burris R.H. *In situ* studies on N₂ fixation using the acetylene reduction technique // *Proceedings National Acad. Sci. USA.* 1967. V. 58. P. 2071–2078.

10. Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA // *Biology and fertility of soils*. 2002. No. 35 (2). P. 128–135.
11. Zielke M., Ekker A.S., Olsen R.A., Spjelkavik S., Solheim B. The influence of abiotic factors on biological nitrogen fixation in different types of vegetation in the high arctic, Svalbard // *Arct. Antarct. Alp. Res.* 2002. V. 34. P. 293–299. doi: 10.1080/15230430.2002.12003497
12. Patova E., Sivkov M., Patova A. Nitrogen fixation activity in biological soil crusts dominated by cyanobacteria in the Subpolar Urals (European North-East Russia) // *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. V. 92. No. 9. P. 1–9. doi: 10.1093/femsec/fiw131
13. DeLuca T.H., Zackrisson O., Gentili F., Selstedt A., Nilsson M.C. Ecosystem controls on nitrogen fixation in boreal feather moss communities // *Oecologia*. 2007. No. 152. P. 124–130. doi: 10.1007/s00442-006-0626-6
14. Stewart K.J., Coxson D., Grogan P. Nitrogen inputs by associative cyanobacteria across a low Arctic tundra landscape // *Arct. Antarct. Alp. Res.* 2011. V. 43 (2). P. 267–278.
15. Larmola T., Leppänen S.M., Tuittila E., Aarva M., Merilä P., Fritze H., Tiirola M. Methanotrophy induces nitrogen fixation during peatland development // *PNAS*. 2014. V. 111 (2). P. 734–739. doi: 10.1073/pnas.1314284111
16. Basilier K., Granhall U., Stenstrom T.A. Nitrogen fixation in wet minerotrophic moss communities of a subarctic mire // *Oikos*. 1978. No. 31 (2). P. 236–246.
17. Rosswall T., Granhall U. Nitrogen cycling in a subarctic ombrotrophic mire // *Ecological Bulletins*. 1980. No. 30. P. 209–234.

Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России

© 2020. Е. Ю. Воякина, к. б. н., с. н. с, Я. В. Русских, к. х. н., с. н. с,
Е. Н. Чернова, к. х. н., с. н. с, З. А. Жаковская, к. б. н., зав. отделом,
ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической
безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН),
197110, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д. 18,
e-mail: katerina.voyakina@gmail.com

В последние десятилетия проблема «вредоносного цветения водорослей» давно уже стала актуальной для водоёмов Северо-Запада России. Впервые в России в ходе одного исследования были получены данные о распространении цианобактерий, их составе и концентрации цианотоксинов в ряде эвтрофных водоёмов на Северо-Западе России. В период исследования (2008–2018 гг.) в озёрах Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское в Санкт-Петербурге в период активной вегетации цианобактерий детектировано присутствие микроцистинов и нейротоксичного анатоксина-а. Виды *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralf et Born et Flah., *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom., species of *Microcystis* (*M. aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wesenbergii* Kom., *M. viridis* (A. Br.) Lemm.) доминировали в планктоне в период вегетации. Впервые в России были выявлены виды-продуценты микроцистинов в Финском заливе. Получены данные о продуцировании анатоксина-а в Финском заливе видом *A. flos-aquae*, часто доминирующим в Балтийском море и нетоксичным. В Псковско-Чудском озере России установлено присутствие токсичных видов цианобактерий и детектировано присутствие микроцистинов.

Ключевые слова: цианобактерии, цианотоксины, эвтрофные водоёмы, альгоценозы, массовые виды, хромато-масс-спектрометрия.

Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest

© 2020. E. Ju. Voyakina ORCID: 0000-0003-4620-5864

Ia. V. Russkikh ORCID: 0000-0003-1762-3055

E. N. Chernova ORCID: 0000-0002-2135-4540

Z. A. Zhakovskaya ORCID: 0000-0002-5620-1317

Saint-Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety,
Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya St., St. Petersburg, Russia, 197110,
e-mail: katerina.voyakina@gmail.com

In recent decades, cyanobacterial blooms have also been reported from water bodies located in the Northwest of Russia. For the first time in Russia, in one study, data were obtained on the distribution of cyanobacteria and the composition and concentration of cyanotoxins in a number of eutrophic water bodies in Northwest of Russia. The active vegetation of cyanobacteria was noted in these water bodies. The study of the toxin determination has been carried out using method of high-performance liquid chromatography – tandem mass-spectrometry on LTQ OrbiTrap instrument (“Finnigan”) with linear and orbital traps in the electrospray-ionization (ESI+). The characteristic mass-spectra of analytes have been registered using high-resolution mass-spectrometry and tandem mass-spectrometry. Two eutrophic lakes (Lake Sestroretskiy Razliv and Lake Suzdalskoe) were investigated in the warm period from June to September of 2008–2018. The important contribution to the phytoplankton was made by cyanobacteria (more than 90% of total abundance). *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralf et Born et Flah., *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom., species of *Microcystis* (*M. aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wesenbergii* Kom., *M. viridis* (A. Br.) Lemm.) were dominated in plankton during the period of investigation. Maximum concentration of microcystins (8.2 mkg/L) was noted in middle of July 2014 in Lake Sestroretskiy Razliv. Maximum concentration of anatoxin-a (1.7 mkg/L) was also marked in July 2014 in Lake Suzdalskoe. Data were obtained on the production of toxoid in the Gulf of Finland by the species *Aphanizomenon flos-aquae*, which is often dominant and non-toxic in the Baltic Sea. For the first time in Russia, species-producers of microcystins in the Gulf of Finland were identified. The presence of toxic types of cyanobacteria was established in the Peipsi Lake (Pskovsko-Chudskoe) in some reservoirs of the European North of Russia, and the presence of microcystins was detected.

Keywords: cyanobacteria, cyanotoxins, eutrophic water bodies, algal blooms, dominant species, mass spectrometry.

«Цветение» водорослей и цианобактерий (ВЦВ) признано одной из актуальных проблем современного мира в связи с его негативным воздействием на водные объекты и водопользователей [1–5]. В большинстве стран Евросоюза, в США, Канаде и Австралии разработаны национальные программы по мониторингу «цветения». Причины, вызывающие «цветение» воды, очевидны (благоприятные погодные условия и наличие в воде избыточного количества биогенных элементов) [2–5]. Механизмы «цветения» мало изучены, и эффективных методов их устранения пока нет. В России, в том числе на Северо-Западе, также существуют экологические проблемы, вызванные «цветением» водоёмов [6]. В настоящее время «цветут» практически все водоёмы Северо-Запада России. «Цветёт» Ладожское озеро, которое служит источником водоснабжения г. Санкт-Петербурга, активная вегетация цианобактерий наблюдается в Балтийском море. Большие проблемы для жителей г. Сестрорецка создаёт регулярное «цветение» водохранилища Сестрорецкий Разлив [6].

Цианобактерии (синезелёные водоросли, цианопрокариоты) отличаются высокой способностью к адаптации, распространены практически повсеместно, могут находиться во всех экосистемах от наземных до водных сред обитания, в том числе и в экстремальных условиях. На сегодняшний день установлено, что 46 видов цианобактерий способны продуцировать токсичные метаболиты (цианотоксины), которые представляют опасность для здоровья людей и животных. Из цианобактерий, формирующих «цветение» воды и выделяющих токсины, особого внимания заслуживают роды *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Phormidium*, *Nostoc*, *Anabaenopsis* и *Nodularia* [6–8].

До недавнего времени информация по цианотоксинам и видовому составу цианобактерий для водоёмов Европейской части РФ практически отсутствовала. Это направление исследований только недавно начало развиваться в Российской Федерации [9–11].

Подробные исследования сезонной динамики цианобактерий и их метаболитов на Северо-Западе РФ, в том числе в водоёмах г. Санкт-Петербурга, были начаты НИЦЭБ РАН ещё в 2008 г. Исследование проводили на пресноводных акваториях, различающихся по лимнологическим параметрам, трофическому статусу (от мезотрофных до гиперэвтрофных), структуре фитопланктона, спектру и концентрации цианотоксинов. Наиболее

интересные данные были получены для водоёмов г. Санкт-Петербурга со значительной рекреационной нагрузкой (оз. Сестрорецкий Разлив и оз. Нижнее Суздальское) [10, 11]. В последнее время (2015–2018 гг.) был расширен ареал исследований. Было проведено исследование структуры альгоценозов и цианотоксинов в воде и биомассе цианобактерий в озере Псковско-Чудское и прибрежной зоне восточной части Финского залива.

Цель работы – оценка содержания цианотоксинов в различных акваториях Северо-Запада России в зависимости от структурных показателей цианобактерий.

Материалы и методы

В работе приведены результаты исследования водоёмов, расположенных на Северо-Западе России, с активной вегетацией цианобактерий. Отбор проб в озёрах Сестрорецкий разлив и Нижнее Суздальское осуществляли с июня по сентябрь в 2008–2018 гг. В восточной части Финского залива исследования проводили в основном на акватории прибрежной зоны Курортного района в июне – августе 2015 и 2018 гг. В Псковско-Чудском озере пробы отбирали эпизодически в июле–августе 2017–2018 гг.

Количественные пробы фитопланктона объёмом 1 л отбирали с поверхности воды. Для фиксации проб фитопланктона использовали кислый раствор Люголя в модификации Усачёва. Биомассу фитопланктона определяли общепринятым способом с учётом того, что 10^9 мкм³ соответствует 1 мг сырой биомассы. За счётную единицу принимали клетку. Объём водорослей устанавливали методом геометрического подобия.

Для определения профиля цианобактериальных токсинов и их количественного определения использовался метод высокоэффективной жидкостной хроматографии – масс-спектрометрии высокого разрешения (ВЭЖХ-МС-ВР) (LTQ OrbiTrap («Finnigan»), ESI+) [10, 11].

Объектами исследования были водоёмы с высоким уровнем трофии. Озеро Сестрорецкий Разлив – самый крупный водоём в черте г. Санкт-Петербурга. Озеро расположено в пределах водосборного бассейна и в непосредственной близости от Финского залива. На водосборной площади располагается государственный природный заказник «Сестрорецкое болото». Высокая цветность воды (до 220 °Pt-Сo шкале) и значительное содержание взвешенных веществ как автохтонной, так и

аллохтонной природы обуславливают невысокие значения прозрачности воды (менее 0,3 м).

Нижнее Суздальское озеро – самый большой водоём в системе Суздальских озёр. Для гидрохимического режима оз. Нижнее Суздальское характерны более щелочная реакция воды (7,4–9,4 ед.) и более узкие диапазоны биогенных элементов по сравнению с оз. Сестрорецкий Разлив. Наибольший диапазон был отмечен для общего фосфора (0,012–0,350 мг/л). Суздальские озёра испытывают значительное антропогенное влияние вследствие поступления хозяйственно-бытовых сточных вод.

Псковско-Чудское озеро относится к бассейну Балтийского моря Атлантического океана. Водоём проточный, подвержен процессам интенсивного эвтрофирования с семидесятых-восьмидесятых годов прошлого века. Вода в озере пресная, слабо минерализованная и имеет малую прозрачность (до 2,5 м), что объясняется значительным количеством взвешенных частиц, приносимых реками, а также развитием планктона [12].

Финский залив, расположенный в восточной части Балтийского моря – это трансграничный водный объект Финляндии, России и Эстонии. Залив относительно неглубокий, с уменьшением глубины от входа в залив до континента. Средняя глубина – 38 м, максимальная – 100 м. Вода залива имеет очень низкую солёность – от 0,2 до 5,8 ‰ на поверхности и 0,3–8,5 ‰ около дна. Эта акватория может быть отнесена к эвтрофным водам [13].

Пресноводные виды цианобактерий обычно встречаются в планктоне во внутреннем устье Финского залива. Во внешнем устье Финского залива распространены виды (*Nodularia spumigena* Mert. ex Born. & Flah., *Dinophysis* sp.), характерные для солоноватых вод [13].

Результаты и обсуждение

Озера Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское. Для водоёмов, расположенных в черте г. Санкт-Петербурга – озёра Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское – в период максимального прогрева воды (июль–август) были характерны высокие значения биомассы фитопланктона (табл.). Среднесезонные значения биомассы варьировали от 11,4±3,1 до 42,9±24,4 мг/л. Большую часть сезона по численности доминировали цианобактерии, на их долю приходилось более 90% от общей численности. В озёрах доминировали токсигенные виды цианобактерий (*Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralf et Born et Flah., виды рода *Microcystis*, *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom.). В разные годы в сезонной динамике фитопланктона в оз. Сестрорецкий Разлив чаще всего было характерно наличие одного пика, связанного с вегетацией диатомовых водорослей и цианобактерий. В оз. Нижнее Суздальское пик вегетации фитопланктона был обусловлен активной вегетацией цианобактерий и динофитовых водорослей.

Таблица / Table

Показатели обилия фитопланктона, доминирующие виды цианобактерий и токсинов в исследованных водоёмах
Abundance and biomass of phytoplankton, dominant species of cyanobacteria and toxins in the studied water bodies

Водоём Water bodies	Численность, млн кл./л Abundance, mln. cell/L	Биомасса, мг/л Biomass, mg/L	Доминирующие виды цианобактерий / Dominant species of cyanobacteria
Оз. Сестрорецкий Разлив Lake Sestroretskiy Razliv	178,9±25,4 (3,2–849,6)	22,1±3,0 (1,6–188,8)	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> <i>Planktothrix agardhii</i> <i>Microcystis aeruginosa</i> <i>M. viridis</i> <i>M. wesenbergii</i>
Оз. Нижнее Суздальское Lake Suzdalskoe	127,7±17,5 (3,3–400,3)	47,9±20,4 (2,3–1112,6)	<i>A. flos-aquae</i> <i>M. aeruginosa</i> <i>P. agardhii</i>
Оз. Псковско-Чудское Lake Pskovsko- Chudskoe	148,4±33,6 (64,8–205,5)	1,5±0,8 (0,48–2,39)	<i>Planktolyngbya limnetica</i> <i>Aphanocapsa</i> spp. <i>Woronichinia compacta</i>
Финский залив Gulf of Finland	211,7±65,1 (20,5–395,4)	19,1±6,3 (2,4–39,3)	<i>Aphanocapsa planctonica</i> <i>A. flos-aquae</i> <i>M. aeruginosa</i> <i>P. agardhii</i> <i>Dolichospermum</i> spp.

В пробах природной воды и биомассы из этих озёр при доминировании потенциально токсигенных видов цианобактерий ежегодно обнаруживали микроцистины (табл.). Всего было идентифицировано 20 структурных вариантов микроцистинов и анабаенопептины. Наибольший вклад вносили микроцистины MC-RR, MC-LR и MC-YR, их деметилированные варианты, также были детектированы и редко встречаемые [D-Glu-OCH₃6]MC-LR, [D-Asp₃, Dha7]MC-RR, [Dha7]MC-FR, MC-(H₄)-YR, MC-WR, [D-Asp₃, Dha7]MC-YR, [D-Asp₃]MC-WR, MC-LW. В летний период неоднократно регистрировалось и присутствие нейротоксичного анатоксина-а. Концентрация и количество структурных форм токсинов зависели от состава и уровня вегетации цианобактерий.

Максимальная концентрация микроцистинов в воде была отмечена в июле 2014 г. в оз. Сестрорецкий Разлив (8,2 мкг/л). В летний период в 2010–2015 гг. и в августе 2018 г. в оз. Нижнее Суздальское основным видом был *Aphanizomenon flos-aquae* и в это же время был отмечен в воде анатоксина-а. Его максимальные концентрации наблюдались в июле 2014 г. (1,7 мкг/л). Данная концентрация превышала величину допустимого содержания в питьевой воде, установленную в ряде стран (США, Новая Зеландия) [14–15].

В 2017 г. для улучшения экологической ситуации в озере Сестрорецкий Разлив ГосНИОРХ выпустил 1,5 тонны толстолобика, что не могло не сказаться на состоянии биоты этого водоёма. Показатели обилия фитопланктона резко снизились, активной вегетации цианобактерий и значительных концентраций цианотоксинов также не было обнаружено. В 2018 г. вновь была отмечена активная вегетация цианобактерий. Численность фитопланктона варьировала от 23,4 до 400,1 млн кл./л (среднее значение было 147,3±51,3 млн кл./л), а биомасса – от 7,9 до 44,0 мг/л (среднее значение – 19,5±4,4 мг/л). В июне – июле и начале августа лидировал *A. flos-aquae*, в августе – *Planktothrix agardhii*, а в сентябре – октябре – виды из рода *Microcystis*. В период доминирования *A. flos-aquae* отмечали достаточно низкие величины содержания внутриклеточных и внеклеточных микроцистинов (0,03–3,3 мкг/л). В начале августа, когда в планктоне стали активно вегетировать виды рода *Microcystis* и *P. agardhii* наблюдалось увеличение содержания микроцистинов. В этот период детектирована их максимальная концентрация (3,3 мкг/л) и наибольшее количество структурных вариантов (13).

Наибольший вклад вносили микроцистины MC-RR, MC-LR, MC-YR и их деметилированные варианты. Содержание наиболее токсичного MC-LR в течение сезона составляло 0,005–0,36 мкг/л.

В 2018 г. в оз. Нижнее Суздальское численность фитопланктона варьировала от 17,0 до 245,0 млн кл./л, а биомасса – от 6,9 до 29,3 мг/л. Средневегетационное значение биомассы составляло 17,0±2,7 мг/л. В сезонной динамике фитопланктона прослеживался обширный летний максимум (июнь – начало августа). Как и в оз. Сестрорецкий Разлив, здесь тоже большую часть сезона доминировали *Aphanizomenon flos-aquae*, *P. agardhii*, *M. aeruginosa*. Минимальное содержание внутриклеточных токсинов было детектировано в конце мая (0,03 мкг/л), максимальное – в конце августа (6,9 мкг/л). Концентрация наиболее токсичного MC-LR менялось в диапазоне 0,006–1,04 мкг/л, с максимумом в конце августа. Кроме того, в летний период в фитопланктоне неоднократно регистрировалось присутствие нейротоксичного анатоксина-а (0,01–0,61 мкг/л), когда доминировали *P. agardhii* и *A. flos-aquae* – вероятные продуценты нейротоксинов (табл.).

Прибрежная зона восточной части Финского залива. В прибрежной зоне восточной части Финского залива эпизодически наблюдались резкие вспышки цианобактериального «цветения» воды с экстремально высокими концентрациями цианотоксинов как в воде, так и в биомассе. В сентябре 2015 г. в пробах воды прибрежной зоны восточной части Финского залива в Курортном районе наблюдалась активная вегетация цианобактерий (численность – 20,5 млн кл./л, биомасса – 2,4 мг/л). В планктоне доминировали виды *Aphanocapsa planctonica* (Smith) Kom. & Anag., *Microcystis aeruginosa*, *P. agardhii*, виды рода *Dolichospermum*. Как следствие, были обнаружены высокие концентрации микроцистинов (более 40,0 мкг/л), превышающие в два раза уровни содержания в рекреационных водах, рекомендованные ВОЗ (20 мкг/л) [16]. Кроме того, в них детектировано и присутствие анатоксина-а (0,6 мкг/л).

В конце августа 2018 г. в Финском заливе в районе Зеленогорска и Репино были отмечены случаи массовой вегетации цианобактерий. Численность изменялась от 219,6 до 395,4 млн кл./л, биомасса – 15,5–39,3 мг/л. Основными видами были потенциально токсичные – *A. flos-aquae*, виды

рода *Dolichospermum* и *P. agardhii*. В пробах воды и биомассы было зарегистрировано присутствие микроцистинов. В пробе биомассы в районе Зеленогорска было идентифицировано 6 структурных вариантов МС. Их суммарное содержание составляло 54 мкг/г лиофилизированной биомассы, причём наибольший вклад вносили широко распространённые аргинин-содержащие варианты: МС-LR (15,26 мкг/г), МС-RR (11,63 мкг/г). Содержание внеклеточных форм микроцистинов в пробе воды составляло 1,90 мкг/л. Наибольшие концентрации были установлены для МС-LR (0,61 мкг/л) и МС-RR (0,61 мкг/л).

Пробы биомассы из Финского залива вблизи п. Репино отличались большим разнообразием структурных вариантов микроцистинов (11 структур). Однако суммарное содержание внутриклеточных микроцистинов (23,03 мкг/г лиофилизированной биомассы) было ниже по сравнению с пробой, отобранной в районе Зеленогорска. Максимальный вклад (14,20 мкг/г) вносил МС-LR. Содержание внеклеточной фракции микроцистинов в воде составляло лишь 0,02 мкг/л. Впервые было проведено качественное и количественное обнаружение анатоксина-а в Финском заливе [11]. Скорее всего, потенциальным продуцентом этого токсина может быть *Aphanizomenon flos-aquae*, но для проверки этого предположения требуется использование ПЦР анализа.

Псковское и Чудское озёра. В 2017–2018 гг. в Псковском и Чудском озёрах были отобраны пробы воды на станциях с визуальными признаками «цветения». Отличительная черта вегетации цианобактерий в озёрах Псковское и Чудское – это высокие значения численности при невысоких значениях биомассы из-за преобладания в планктоне мелкоклеточных форм (табл.). В период исследования наибольшую роль в планктоне играли *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legner. & Cronq., а также виды родов *Aphanocapsa* и *Woronichinia*. Доля цианобактерий в общей численности превышала 90%. В июле в пробах воды Чудского озера внеклеточных токсинов детектировано не было, а в воде из Псковского озера детектировано наличие наиболее токсичного представителя микроцистинов МС-LR, его концентрация варьировала от 0,03 до 0,09 мкг/л. В середине августа 2017 г. в пробах воды из Псковского озера было идентифицировано 5 структурных вариантов микроцистинов, их суммарное содержание составило 0,22 мкг/л, причём основной вклад опять вносил МС-LR. Несмотря на то, что 2018 г.

был тёплым и солнечным, в исследованных озёрах отмечено только эпизодическое «цветение» воды, и содержание цианотоксинов было незначительно. Суммарное содержание внутриклеточных микроцистинов составило 0,02–0,21 мкг/л. Максимальная концентрация была отмечена в Псковском озере. В пробах биомассы детектировано 9 аргинин-содержащих структурных вариантов микроцистинов. Присутствие нейротоксичных анатоксина-а и сакситоксинов в пробах воды и биомассы не зарегистрировано.

Заключение

Таким образом, впервые в России временно получены данные о содержании цианобактерий и выделяемых ими цианотоксинов в разнотипных водоёмах на Северо-Западе РФ. Аналогичных работ в России ранее не проводилось. Для исследованных акваторий характерно доминирование в летний период потенциально токсичных цианобактерий. Наибольшие значения показателей обилия цианобактерий наблюдались в озёрах в черте г. Санкт-Петербурга (Сестрорецкий Разлив и Нижнее Суздальское) (табл.). Использование в работе разработанных нами методик масс-спектрометрического анализа цианотоксинов различных классов позволило оценить не только суммарное содержание токсинов, что достаточно часто встречается в работах такого рода, но и определить индивидуальные варианты структур. Полученные результаты показывают, что уровень детектируемых токсинов и их спектр в водоёмах России соответствуют данным, полученным для других стран [4].

В целом в воде и в фитопланктоне в разнотипных водоёмах г. Санкт-Петербурга (оз. Нижнее Суздальское и Сестрорецкий Разлив) идентифицировано 20 структурных вариантов микроцистинов, их концентрация в летний период представляет угрозу для здоровья населения. Впервые проведён поиск цианотоксинов в прибрежной зоне восточной части Финского залива, в Псковском и Чудском озёрах. В воде восточной части Финского залива обнаружено 11 различных структурных вариантов микроцистина, а в Псковско-Чудском – 9 аргинин-содержащих структурных вариантов микроцистинов. Показано, что разнообразие и концентрации цианотоксинов в связи с составом доминирующих видов цианобактерий и уровнем вегетации. Исследование акваторий требует пристального дальнейшего внимания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-04-01069. Статья опубликована при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-20031.

References

1. WHO. Guidelines for Drinking Water Quality. 4th ed: World Health Organization. 2011.
2. Falconer I.R. An overview of problems caused by toxic blue-green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water // *Environ. Toxicol.* 1999. No. 14. P. 5–12.
3. Carmichael W.W. Health effects of toxins – producing cyanobacteria: “The cyanoHABs” // *Hum. Ecol. Risk Assess.* 2001. V. 7. P. 1393–1407.
4. Pawlic-Skowronska B., Skowronski T., Pirszel J., Adamczyk A. Relationship between cyanobacterial bloom composition and anatoxin-a and microcystin occurrence in the eutrophic Dam reservoir (se Poland) // *Pol. J. Ecol.* V. 52 (4). 2004. P. 479–490.
5. Wood S.A., Stirling D.J., Briggs L.R., Sprosen J., Holland P.T., Ruck J.G., Wear R.G. Survey of cyanotoxins in New Zealand waterbodies between 2001 and 2004 // *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research.* 2006. V. 40. No. 4. P. 585–597. doi: 10.1080/00288330.2006.9517447
6. Bloom-forming algae in water bodies of Northwestern of Russia. Moskva: KMK, 2006. 367 p. (in Russian).
7. Codd G.A., Morrison L.F., Metcalf J.S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection // *Toxicology and Applied Pharmacology.* 2005. V. 203. P. 264–272. doi: 10.1016/j.taap.2004.02.016
8. Patova E.N. Cyanoprokaryotic “flowering” of water bodies of the East European tundra (floristic and functional aspects) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2007. No. 3. P. 4–10 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-004-010
9. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh I.V. Analysis of phytoplankton in Tsimlyansk Reservoir (Russia) for the presence of cyanobacterial hepato- and neurotoxins // *Microbiology.* 2015. V. 84. P. 828–837. doi: 10.7868/S0026365615060130
10. Chernova E., Russkikh I.A., Voyakina E., Zhakovskaya Z. Occurrence of microcystins and anatoxin-a in eutrophic lakes of Saint Petersburg, northwestern Russia // *Oceanological and hydrobiological studies.* 2016. V. 45. No. 4. P. 466–484. doi: 10.1515/ohs-2016-0040
11. Chernova E., Sidelev S., Russkikh I.A., Voyakina E., Zhakovskaya Z. First observation of microcystin- and anatoxin-a-producing cyanobacteria in the easternmost part of the Gulf of Finland (the Baltic Sea) // *Toxicon.* 2019. V. 157. P. 18–24. doi: 10.1016/j.toxicon.2018.11.005
12. Sokolov A.A. Hydrography of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1952. 287 p. (in Russian).
13. Nikulina V.N., Gubelit, Yu.I. Cyanobacteria and macroalgae in ecosystem of the Neva estuary // *Knowl. Manage. Aquat. Ecosyst.* 2011. V. 402. No. 6. P. 1–12. doi: 10.1051/kmae/2011049
14. Burch M.D. Effective doses, guidelines & regulations // *Advances in Experimental Medicine and Biology.* 2008. V. 619. P. 831–853.
15. Farrer D., Counter M., Hillwig R., Cude C. Health-based cyanotoxin guideline values allow for cyanotoxin-based monitoring and efficient public health response to cyanobacterial blooms // *Toxins.* 2015. V. 7. P. 457–477. doi: 10.3390/toxins7020457
16. Guidelines for safe recreational water environments. V. 1: Coastal and fresh waters. Geneva: World Health Organization, 2003. 253 p.

Ростстимулирующая активность листоватых лишайников

© 2020. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, А. Л. Ковина¹, к. б. н., доцент, С. Ю. Огородникова², к. б. н., с. н. с., А. И. Коротких¹, магистрант, А. В. Короткова¹, магистрант, Е. А. Домнина^{2,3}, к. б. н., доцент,

¹Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

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

Показана возможность практического использования двух видов листоватых лишайников *Parmelia sulcata* Tayl. и *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. при выращивании люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.). При определении численности различных физиологических групп микроорганизмов, входящих в состав поверхностных микробиомов исследуемых видов лишайников, установлено, что доминирующей группой микробных комплексов являются азотфиксирующие бактерии, численность которых составляет свыше 100 тыс. КОЕ/г. В процессе хранения лишайников в высушенном состоянии количество микроорганизмов на поверхностных микробиомах и соотношение физиологических групп меняется незначительно.

Предполагается, что использование лишайников как агентов воздействия на рост и развитие высших растений обусловлено как поверхностной микрофлорой лишайников, так и веществами, вырабатываемые их слоевищами. В модельных опытах установлен ростстимулирующий эффект измельченной биомассы лишайников на биометрические и биохимические показатели высшего растения. В частности, наиболее ярко проявляется этот эффект при определении индекса роста люпина, который, по сравнению с контрольным вариантом, в случае с *P. sulcata* выше в 1,21 раза, а с *H. physodes* – в 1,36 раза. Исследования состояния растительной клетки по такому показателю, как перекисное окисление липидов, выявили разнонаправленный характер изменения интенсивности окислительных процессов в надземной и подземной частях проростков. Так, в листьях содержание малонового диальдегида (МДА) ниже, чем в контрольном варианте, тогда как в корнях концентрация этого соединения в вариантах с лишайниками более чем на 50% выше по сравнению с контролем. Вероятно, предпосевная обработка семян люпина мульчированной биомассой лишайников, обеспечивающая непосредственный контакт с прорастающими корнями растений, оказалась стресс-фактором, под влиянием которого запустился окислительный процесс в клетках, что привело к увеличению концентрации МДА в опытных вариантах.

Ключевые слова: листоватые лишайники, микробиомы лишайников, люпин узколистный, индекс роста, перекисное окисление липидов.

Growth-stimulating activity of leafy lichens

© 2020. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, A. L. Kovina¹ ORCID: 0000-0003-0503-3402, S. Yu. Ogorodnikova² ORCID: 0000-0001-8865-4743, A. I. Korotkikh¹ ORCID: 0000-0002-0700-371X, A. V. Korotkova¹ ORCID: 0000-0001-7292-7655, E. A. Domnina^{2,3} ORCID: 0000-0002-5063-8606

¹Vyatka State Agricultural Academy, 133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

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

The possibility of the practical use of two species of leafy lichens *Parmelia sulcata* Tayl. and *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. when growing *Lupinus angustifolius* L. When determining the number of various physiological groups of microorganisms that are part of the surface microbiomes of the studied lichen species, it was shown that nitrogen-fixing bacteria, the number of which exceeds 100 thousand CFU/g, are the dominant group of microbial complexes. Wherein, during

storage of lichens in the dried state, the number of microorganisms in surface microbiomes and the ratio of physiological groups varies slightly.

It is assumed that the use of lichens as agents affecting the growth and development of higher plants is due to both the surface microflora of lichens and the substances produced by their thalli. In model experiments, the growth-promoting effect of ground lichen biomass on the biometric and biochemical parameters of higher plants was established. In particular, the growth-stimulating effect is most pronounced in determining the growth index, which is 1.21 times higher in comparison with the control variant in *P. sulcata* and 1.36 times higher in *H. physodes*. Studies of the state of the plant cell in terms of lipid peroxidation revealed the differently directed nature of the change in the intensity of oxidative processes in the aboveground and underground parts of plants. So, the malondialdehyde (MDA) content in the leaves is lower than in the control variant, while in the roots the concentration of this compound is more than 50% higher than in the control in the lichen variants. It is likely that the pre-sowing treatment of lupine seeds with mulched lichen biomass, which provides direct contact with the germinating roots of plants, turned out to be a stress factor, under the influence of which the oxidative process in the cells started, which led to an increase in MDA compared to the control variant.

Keywords: leafy lichens, lichen microbiomes, growth index, lipid peroxidation.

Лишайники представляют собой одну из наиболее древних моделей симбиотических взаимоотношений микобионта с фототрофными партнёрами – водорослями или цианобактериями [4]. Не затихающий интерес к данной группе организмов во многом связан с тем, что, с одной стороны, метод лишеноиндикации является одним из наиболее применяемых в биодиагностике состояния окружающей среды [2, 3]. С другой стороны, интерес к лишайникам обусловлен синтезом веществ, издавна применяемых как лекарственные средства. На сегодняшний день известно более 1 тыс. вторичных метаболитов лишайников, на долю которых приходится до 5% сухой массы [4–5]. Эти вещества имеют такие свойства, как противовирусная, противобактериальная, противомикотическая, противовоспалительная, жаропонижающая, обезболивающая, антипрофелиративная и цитотоксическая активность. Противораковую активность обеспечивает такой метаболит лишайников, как усниновая кислота [6].

Вероятно, что многие свойства лишайников объясняются не только характером мутуалистических взаимоотношений между входящими в их состав фико- и микобионтами, но определённую роль в жизни лишайников играет специфический микробный комплекс, обитающий на поверхности талломов. В частности, на примере кустистых лишайников, отобранных в районе хребта Хибин Мурманской области, были установлены численность, таксономический состав, приуроченность бактерий гидролитического комплекса к определённой стадии существования конкретного вида [7–9]. Как и у высших растений, в зоне обитания лишайников формируется особая зона, обозначаемая термином «лихеносфера». Это слой лишайниковой дерновинки с условиями, создающими защитную микросреду обитания, благоприятную для

организмов-поселенцев: редуцентов, паразитов, эндемиков. Условия, создаваемые в лишайниковой дерновинке, обеспечивают питанием микроорганизмы (МО) и создают защитный барьер против низкой температуры, олиготрофии, сильных ветров и ультрафиолетового излучения, помогая МО, неприспособленным к экстремальным условиям, выжить и распространиться [10]. Микробы лихеносферы должны также обладать специфической устойчивостью к метаболитам лишайников, токсичным для посторонней микробиоты.

Одним из направлений практического использования лишайников стала разработка на их основе протравителей семян и стимуляторов роста сельскохозяйственных растений как альтернативы применению химических пестицидов и стимуляторов роста, использование которых неизбежно приводит к негативным последствиям: изменению видового состава полезных МО, нарушению биологического равновесия в агроценозах и общему ухудшению экологической обстановки [11].

Целью наших исследований было определение численности и группового состава микробиомов листовых лишайников, а также изучение возможности использования лишайников как стимуляторов роста бобовых растений на примере люпина узколистного.

Объекты и методы

Объектами исследования были талломы двух видов листоватых лишайников: *Parmelia sulcata* Tayl. и *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., отобранные в конце сентября 2018 г. Пармелию собирали в окрестностях г. Кирова (село Макарье) со стволов и веток деревьев лиственных и хвойных пород, гипогимнию – вблизи пос. Мирный Оричевского района Кировской области. Данный вид в течение многих лет использовался для диагностики атмосферного

загрязнения в районе функционирования объекта по хранению и уничтожению химического оружия «Марадыковский» [12]. В качестве тестируемого растительного объекта использовали семена люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.).

Для оценки численности эпифитной микрофлоры лишайников применяли посев смывов с талломов на селективные агаризованные среды. Методом предельных разведений учитывали 3 группы МО: аммонификаторы на среде ГРМ (гидролизат рыбной муки), азотфиксаторы на среде Эшби и микромицеты на среде Чапека. Посев на каждую питательную среду проведён в трёхкратной повторности.

При выращивании люпина использовали метод рулонных культур в 4-х кратной повторности из расчёта 15 семян люпина на рулон. Слоевница листоватых лишайников высушивали до воздушно-сухого состояния, затем измельчали биомассу в мульчу. В опытных вариантах измельчённую биомассу вносили непосредственно поверх семян. Для увлажнения использовали родниковую воду. При снятии опыта через 7 суток определяли всхожесть, длину корней, высоту проростков, индекс роста по формуле:

$$I = (R+P) \cdot D,$$

где *I* – индекс роста, *R* – суммарное значение длин корней (см), *P* – суммарное значение длин проростков (см), *D* – доля проросших семян (%) [13].

Показатель интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) у проростков определяли по накоплению малонового диальдегида (МДА) [14].

Результаты и обсуждение

Определение численности эпифитной микрофлоры изучаемых видов лишайников показало, что наблюдается незначительное различие как в количественном обилии их эписионтов, так и по отдельным физиологическим группам МО (табл. 1). Наиболее обильна эпифитная микрофлора лишайника р. *Hypogymnia*, а наименее – р. *Parmelia* (в 1,5 раза). Доминируют в микробных комплексах обоих видов азотфиксирующие бактерии. При этом, как показано ранее [15], в процессе хранения лишайников в высушенном состоянии численность МО в поверхностных микробиомах лишайников и соотношение физиологических групп практически не меняется.

В дальнейшем было установлено, что биомасса лишайников незначительно повлияла на процент всхожести люпина узколистного (табл. 2). Длина корней и высота проростков в опытных вариантах выше, чем в контроле. Наибольший ростстимулирующий эффект наблюдался в варианте с использованием биомассы лишайника *H. physodes*. Вероятно, это объясняется тем, что партнёры ассоциации фотобионт-микобионт, формирующие таллом лишайника, активно взаимодействуют друг с другом и для поддержания структуры и кле-

Таблица 1 / Table 1

Численность эпифитной микробиоты лишайников (КОЕ/г · 10³, в числителе) и соотношение различных группировок (% , в знаменателе)
The number of lichen epiphytic microbiota (CFU/g · 10³, in the numerator) and the ratio of different groups (% , in the denominator)

Лишайник Lichen	Аммонификаторы Ammonifiers	Азотфиксаторы Nitrogen fixers	Микромицеты Micromycetes	Всего Total
<i>Parmelia sulcata</i>	<u>30,7±6,5</u> 19,3	<u>103,3±7,7</u> 65,0	<u>25,0±3,4</u> 15,7	<u>159,0±17,6</u> 100
<i>Hypogymnia physodes</i>	<u>45,7±6,8</u> 18,0	<u>136,0±7,0</u> 53,4	<u>70,7±4,5</u> 28,6	<u>254,4±18,3</u> 100

Таблица 2 / Table 2

Влияние листоватых лишайников на рост и развитие люпина узколистного
The influence of leafy lichens on the growth and development of *Lupinus angustifolius*

Вариант Variant	Всхожесть, % Germination, % D	Длина корня, см Length of root, cm R	Высота проростков, см Height of seedlings, cm P	Индекс роста Growth Index I
Контроль / Control	95,0±10,0	4,4±0,5	6,0±0,5	990,8
<i>Parmelia sulcata</i>	93,3±7,6	5,5±0,7	7,4±0,9	1202,6
<i>Hypogymnia physodes</i>	93,3±7,6	5,9±0,7	8,5±0,7	1347,2

Таблица 3 / Table 3

Накопление малонового диальдегида при перекисном окислении липидов в проростках люпина узколистного на 7-е сутки, нмоль/г
The accumulation of malondialdehyde during lipid peroxidation in seedlings of *Lupinus angustifolius* on the 7th day, nmol/g

Вариант Variant	Содержание МДА Malondialdehyde content	Процент к контролю Percent to control
Leaves / Leaves		
Контроль / Control	35,07±3,13	100,0
<i>Parmelia sulcata</i>	32,82±0,83	93,6
<i>Hypogymnia physodes</i>	29,58±1,88*	84,3
Корни / Roots		
Контроль / Control	22,43±2,74	100,0
<i>Parmelia sulcata</i>	35,82±2,35*	159,7
<i>Hypogymnia physodes</i>	34,45±1,42*	153,6

Примечание: * – различия достоверны при $P \geq 0,95$.
Note: * – the differences are significant at $P \geq 0.95$.

точного обмена используют продукты своего метаболизма [6]: лихенин, пектины, дисахариды, аминокислоты, витамины, ферменты, которые используются и высшими растениями.

Интегральным показателем состояния растений является индекс роста (I), который в наших опытах при использовании обоих лишайников существенно выше, чем в контроле (табл. 2).

Рост и развитие растений люпина во многом зависят от эффективности биохимических изменений, происходящих в клетках, направленных на адаптацию к действию лишайников, присутствующих в среде выращивания. Одним из показателей интенсивности окислительных процессов в клетках является накопление продукта перекисного окисления липидов – малонового диальдегида (МДА).

Перекисное окисление липидов (ПОЛ) – цепной процесс свободнорадикального окисления ненасыщенных жирных кислот, в норме поддерживается на определённом уровне за счёт функционирования антиоксидантной системы. Чрезмерная активация процесса ПОЛ в стрессовых условиях приводит к нарушению структуры многих молекул, в том числе белков, ДНК, уменьшается стабильность мембран, происходит инактивация ферментов, образуются дефекты в липидном слое мембран, увеличивается ионная проницаемость липидного биослоя и, как следствие, происходит утечка электролитов. Изменение интенсивности процессов ПОЛ может свидетельствовать как о патологических состояниях, так и о процессах адаптации.

По накоплению содержания МДА в корнях и листьях люпина узколистного можно

судить о положительном, либо отрицательном влиянии лишайников на развитие растения.

Выращивание люпина в присутствии биомассы лишайников вызвало изменение активности процессов ПОЛ в клетках. Содержание МДА в листьях люпина в вариантах с действием лишайников было ниже, по сравнению с контролем (табл. 3). Уменьшение накопления МДА в листьях свидетельствует о снижении интенсивности окислительных процессов в фотосинтезирующих органах люпина в присутствии лишайников. Низкий уровень накопления МДА в варианте с гипогимнией указывает на положительный эффект листоватого лишайника для роста и развития растения за счёт снижения интенсивности окислительных процессов в листьях люпина. Возможно, это связано с действием на растения комплекса соединений, которые выделяют лишайники в процессе функционирования.

Реакция корней люпина на действие лишайников отличалась от реакции надземных органов. В корнях растений отмечено увеличение МДА на 59,7% в варианте с пармелией и на 53,6% в варианте с гипогимнией. Вероятно, присутствие лишайника, непосредственно контактирующего с корнями растений, оказалось стресс-фактором, под влиянием которого запустился окислительный процесс в клетках, что привело к увеличению МДА по сравнению с контрольным вариантом.

Заключение

Численность МО в эпифитных микробиомах листоватых лишайников находится в пределах 160–250 тыс. КОЕ/г, при этом у

обоих видов доминирующей группой являются азотфиксирующие бактерии, составляя 53–60% от общей численности МО.

Установлена возможность использования биомассы лишайников в качестве альтернативного ростстимулятора для люпина узколистного.

Тестирование ростстимулирующей активности лишайников показало, что наиболее значимым критерием их положительного влияния оказалась интегральная величина индекса роста, при которой учитывают всхожесть семян, длину корней и высоту проростков.

При использовании такого биохимического показателя, как накопление МДА при перекисном окислении липидов, установили, что листья и корни люпина узколистного по-разному реагируют на действие биомассы листоватого лишайника. В корнях, которые непосредственно контактируют с лишайниками, интенсивность процессов ПОЛ была выше.

Сравнение ростстимулирующего эффекта двух видов листоватых лишайников показало, что лучший результат выявлен при использовании *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., вероятно, он обусловлен не только биологически активными веществами таллома, но и более высокими показателями численности микробов-эпибионтов, в первую очередь, азотфиксаторов.

Литература

1. Каратыгин И.В., Сингиревская Н.С., Викулин С.В. Симбиоз гриба и цианобактерий в девоне // Микология и фитопатология. 2010. № 1. С. 31–36.
2. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
3. Boustiel J., Grube M. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites // Plant Genetic Resources. 2005. V. 3. No. 2. P. 273–287.
4. Kosanić M., Ranković B. Lichen as possible sources of antioxidants // Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences. 2011. V. 24. P. 165–170.
5. Щербаклова А.И., Коптина А.В., Канарский А.В. Биологически активные вещества лишайников // Лесной журнал. 2013. № 3. С. 7–16.
6. Головки Т.К., Шелякин М.А., Захожий И.Г., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н. Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таёжной зоне // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 44–53.
7. Панкратов Т.А., Качалкин А.В., Корчиков Е.С., Добровольская Т.Г. Микробные сообщества лишайников (обзор) // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 265–283.

8. Панкратов Т.А. Бактериальные комплексы лишайников Хибин на примере *Cladonia unciallis*, *C. portentosa*, *Alectonia ochroleuca* и *Nephroma arcticum* // Микробиология. 2018. Т. 87. № 1. С. 70–78.

9. Santiago I.F., Soares M.A., Rosa C.A., Rosa L.H. Lichensphere: a protected natural microhabitat of the non-lichenised fungal communities living in extreme environments of Antarctica // Extremophiles. 2015. V. 19. P. 1087–1097.

10. Храпченкова О.М. Влияние биомассы эпифитных лишайников на прорастание семян злаковых культур // Наука и инновации. 2017. № 5 (171). С. 68–72.

11. Иванов А.И., Дунаева Т.А., Домнина Е.А., Ашихмина Т.Я., Дудин Г.П. Поиск информативных биохимических тестов в практике экологического мониторинга особо опасных объектов // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 4. С. 94–98.

12. Домнина Е.А., Огородникова С.Ю., Пестов С.В., Ашихмина Т.Я. Методы лишеноиндикации в оценке загрязнения атмосферного воздуха соединениями фосфора // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 4. С. 37–44.

13. Abdul-Baki A.A., Anderson J.D. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria // Crop Science. 1973. V. 13. P. 630–633.

14. Лукаткин А.С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. 208 с.

15. Малинина А.И., Домрачева Л.И., Ковина А.Л., Домнина Е.А. Особенности эпифитной микрофлоры различных видов листоватых лишайников // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: ВятГУ, 2019. С. 213–216.

References

1. Karatygin I.V., Singirevskaya N.S., Vikulin S.V. Symbiosis of the fungus and cyanobacteria in Devon // Mikologiya i fitopatologiya. 2010. No. 1. P. 31–36 (in Russian).
2. Byazrov L.G. Lichens in environmental monitoring. Moskva: Nauchnyy mir, 2002. 336 p. (in Russian).
3. Boustiel J., Grube M. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites // Plant Genetic Resources. 2005. V. 3. No. 2. P. 273–287. doi: 10.1079/PGR200572
4. Kosanić M., Ranković B. Lichen as possible sources of antioxidants // Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences. 2011. V. 24. P. 165–170.
5. Shcherbakova A.I., Koptina A.V., Kanarsky A.V. Biologically active substances of lichens // Lesnoy zhurnal. 2013. No. 3. P. 7–16 (in Russian).
6. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Zakhozhy I.G., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. The response of lichens to the

environmental pollution under the bauxite mining in the taiga zone // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1

7. Pankratov T.A., Kachalkin A.V., Korchikov E.S., Dobrovolskaya T.G. Microbial lichen communities (overview) // Mikrobiologiya. 2017. V. 86. No. 3. P. 265–283 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365617030156

8. Pankratov T.A. Bacterial complexes lichen Hibin the example *Cladonia unciallis*, *C. portentosa*, *Alectonia ochroleuca* and *Nephroma arcticum* // Mikrobiologiya. 2018. V. 87. No. 1. P. 70–78 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365618010081

9. Santiago I.F., Soares M.A., Rosa C.A., Rosa L.H. Lichensphere: a protected natural microhabitat of the non-lichenised fungal communities living in extreme environments of Antarctica // Extremophiles. 2015. V. 19. P. 1087–1097. doi: 10.1007/s00792-015-0781-y

10. Khramchenkova O.M. The effect of epiphytic lichen biomass on seed germination of cereal crops // Nauka i innovatsii. 2017. No. 5 (171). P. 68–72 (in Russian).

11. Ivanov A.I., Dunaeva T.A., Domnina E.A., Ashikhmina T.Ya., Dudin G.P. Search for informative

biochemical tests in the practice of environmental monitoring of especially dangerous objects // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 4. P. 94–98 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-4-094-098

12. Domnina E.A., Ogorodnikova S.Yu., Pestov S.V., Ashikhmina T.Ya. Lichenoindication methods for assessing atmospheric air pollution by phosphorus compounds // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 37–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-037-044

13. Abdul-Baki A.A., Anderson J.D. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria // Crop Science. 1973. V. 13. P. 630–633.

14. Lukatkin A.S. Cold damage to heat-loving plants and oxidative stress. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2002. 208 p. (in Russian).

15. Malinina A.I., Domracheva L.I., Kovina A.L., Domnina E.A. Features of epiphytic microflora of various species of leafy lichens // Ecology of the native land: problems and solutions: Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: VyatGU, 2019. P. 213–216 (in Russian).

Electrochemical utilization of disperse copper-iron waste

© 2020. Yu. P. Khranilov¹ ORCID: 0000-0002-2639-9350, A. V. Zakharov¹ ORCID: 0000-0002-6182-8800,
V. L. Kovalenko^{1,2} ORCID: 0000-0002-8012-6732, V. A. Kotok^{1,2} ORCID: 0000-0002-8012-6732,
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Ukrainian State University of Chemical Technology,
8, Gagarina Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005,
e-mail: zwaw@ya.ru

The possibility of processing contaminated copper powder with an iron content of 1.6–12.2% by the electrochemical refining method has been studied. This powder is formed during the processing of copper-containing salt waste of galvanic production by exchange reaction and does not find the application. It is shown that during electro-refining of the contaminated copper powder in the sulfate electrolyte, high-purity cathode copper corresponding to the Cu-ЕСР grade can be obtained. Technological recommendations for the implementation of the process are proposed, in particular, a method of depassivating a titanium current lead to a copper powder.

It was found that along with the anodic dissolution of copper and iron from the powder, the iron component is chemically dissolved due to the copper exchange reaction. In experiments with model solutions, the effect of Fe(III) ions in the electrolyte on the rate of chemical and electrochemical reactions was studied. It was found that the negative effect of Fe(III) ions on the cathode deposition of copper can be reduced with an additive NaF into the electrolyte and increasing the cathode current density.

Keywords: electrochemical copper refining, processing of copper powder waste.

УДК 628.477.6, 669.714.76

Электрохимическая утилизация дисперсных медно-железных отходов

© 2020. Ю. П. Хранилов¹, к. х. н., профессор,
А. В. Захаров¹, аспирант, зав. лабораторией,
В. Л. Коваленко^{1,2}, к. т. н., доцент, В. А. Коток^{1,2}, к. т. н., доцент,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Украинский государственный химико-технологический университет,
49000, Украина, г. Днепр, Днепропетровская обл., пр. Гагарина, д. 8,
e-mail: zwaw@ya.ru

Изучена возможность переработки медного порошка, загрязнённого железом (1,6–12,2%) методом электрохимического рафинирования. Данный порошок образуется при переработке медьсодержащих солевых отходов гальванических производств методом цементации и не находит применения. Показано, что при электрорафинировании загрязнённого медного порошка в сернокислом электролите может быть получена катодная медь высокой чистоты, соответствующая марке М0к. Предложены технологические рекомендации для осуществления процесса, в частности, способ депассивации титанового токоподвода к медному порошку.

Выяснено, что наряду с анодным растворением меди и железа из порошка протекает химическое растворение железной составляющей за счёт цементации меди. В опытах с модельными растворами изучено влияние ионов Fe(III) в электролите на скорость химических и электрохимических реакций. Выявлено, что негативное влияние ионов Fe(III) на процесс катодного осаждения меди может быть уменьшено введением в электролит NaF и увеличением катодной плотности тока.

Ключевые слова: электрохимическое рафинирование меди, переработка медных отходов.

Growing consumption of toxic heavy metals (HM) and their compounds by the industry leads to high emission of them into the environment. Excessive HM concentrations cause significant disruption in living organism on cellular, tissue, population levels. The key feature of HM is that they do not degrade, and cannot be removed from environment via biological or chemical transformations [1].

Copper is one of such toxicants. It is considered that copper has low toxicity to humans, which is evidenced by rather high Threshold Limit Value (TLV) – 1 mg/L in drinking value [2]. According to World Health Organization, “The risk from copper deficiency insignificantly higher, compared to excessive intake of it”. However, recent studies suggest that increased copper concentration in food causes damage to central nervous system and internal organs for people affected by Wilson's disease [3], and worsening Alzheimer's disease symptoms [4]. Researchers tie development of Indian child liver cirrhosis with high copper concentrations in food, namely in milk which is stored in copper containers [5]. Series of studies indicates cancerogenic effect of copper, showing correlation between occupations in copper processing and occurrence of oncological diseases [6].

Effect of copper on other organism is more severe. According to Russian Sanitary Rules and Regulations, allowed copper concentration in drinking water (1 mg/L) is ten times higher than for which toxic effect was observed in laboratory tests on animals [7]. An aqueous organism is more sensitive to copper contamination. For fish, the concentration at which lethality of population is observed is 0.002 mg/L [8]. As such copper TLV for fish farms is 0.001 mg/L [9]. Despite relative toxicity to humans, copper-containing waste poses ecological hazard, especially aqueous organisms.

Due to high specific surface area, copper powder promptly transforms into mobile forms upon contact with soil or water when compared to compact metal. Metallic copper is subjected to oxidation and transforms into soluble form only if air is present, as these processes involve oxygen and carbon dioxide. As such, the process is most intense in upper layer of soil. Upon exposure to atmosphere, a stable film composed of $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ is formed on surface of copper which inhibits further oxidation. Studies suggest that copper dissolution is mainly governed by organic complexing [10]. The stable film reacts with formation of soluble chelate compounds which allows for further oxidation of metal. The

dissolution is most prominent in soils with pH of 4.5–5.5 [11]. Thus copper powder transforms in bioavailable form rather fast. Toxic effect of copper powder was confirmed in model animal experiments [12].

An example of high HM content waste is the waste of galvanic plants. In this case, the importance of this problem is further reinforced by the value of metals in waste, namely copper.

In Russia, aside from spent high copper technological solutions, galvanic plants annually produce about 12000 ton of copper-containing residue [13] and wastewater with an estimated copper content of 815 ton [8].

A common way of removing copper from such waste is cementation. The copper is transformed into soluble form (if necessary), and then it is electrochemically displaced from solution with more active metal, usually iron. As technological process, cementation is fast and is easy to conduct.

During cementation of copper with iron, the dissolution of iron takes place in anodic regions and copper deposition on the cathodic region. As such, the mass of cement metal decreases while copper layer grows. This results in formation of copper powder with some residual iron (CPRI). In practice, the copper is usually cemented with scrapped sheet iron from metal can plants, which was treated to remove tin or iron shavings.

Due to significant difference in standard electrode potentials of iron (-0.44 V) and copper (+0.337 V) [14], copper displacement with iron can occur to almost completion, which allows for successful use of cementation for processing of copper-containing solutions. However, high degree of copper removal requires some excess of cementing metal. The copper content in cement precipitates range from 10 to 95% (usually 55–80%) [15], i. e. the formed CPRI can contain up to 45% iron.

Such processing of copper-containing waste allows to transform salt waste into metal powder, which doesn't low hazard class of the waste, but allows to change it into compact form, convenient for storage and transportation. Processing of 1 m³ of spent sulfuric acid copper electroplating electrolyte results in at least 5 dm³ of copper powder. All of this lead to widespread use of this method and some researchers describe it as promising for processing of copper-containing waste [16].

In Kirov region, processing of copper-containing waste by cementation is conducted by OJSC “Cuprit”. They primarily process spent sulfuric copper electroplating electrolytes and

residue from etching of printed circuit boards in copper-ammonia solution. In 2018, company process more than 50000 m³ of technological solutions, which corresponds to few tons of CPRI.

CPRI produced at OJSC “Cuprit”, has particle size of 0.1–0.5 mm (80%) to 0.5–1.3 mm (20%), iron content of 1.6 to 12.2% and does not correspond to requirements of Russian National Standard GOST 4960-2009 “Electrolytic copper powder”. CPRI finds no further use, due high iron content complicates processing into pure copper. Iron impurity complicates single stage electrorefining (ER) or powder into high purity cathodic copper. Presence of iron in anodic material leads to side chemical and electrochemical reactions complicating the process. Use multistage purification with fire refining (FR) as pre-treatment stage is not economically viable, due to complex equipment and intolerance to small and medium batches. There are methods to utilize CPRI as filler in construction concrete [17], however, inclusion of toxic powder in construction material can result in ecological hazard. Copper is also a valuable metal, so using it as filler is not economically viable.

As such large volumes of CPRI are accumulated within companies that process copper-containing waste, which calls for method that would allow for economically viable processing of copper powder into high purity copper.

Aim of the work is to study the possibility of processing CPRI into high purity copper through electrorefining, by using CPRI as anode. When developing the technology it is necessary to minimize effect of iron dissolving into electrolyte and account for disperse electrode. Such an experimental work was conducted to evaluate quantities influence of iron in electrolyte on refining process.

Modern studies on processing of copper waste

Traditional process of copper waste consist of two stages: fire and electrorefining.

During fire refining (FR), copper is melted and purged with air to oxidize impurities. It is possible due to solubility of copper oxides in liquid copper and their oxidative properties towards the majority of impurities, oxides of which have poor solubility in molten copper. After removal of impurities, copper oxides can be easily reduced by products of wood dry distillation. Copper waste and scrap for FR usually contain up to 4% of impurities, with processed copper having purity of 99.2–99.4% [18].

In [19], FR was used to process copper waste with high nickel content. It is proposed to introduce silicon additives to copper melt, which results in higher purity copper during electrorefining (ER). No similar studies were conducted for waste with high iron content.

In paper [20] describes study on RF of residue containing 40% Fe, 1–2% Cu and 1–2% Zn. Combination of carbothermic method and microwave irradiation allowed for reduction of iron to metal and removal of zinc in form of oxide.

Paper [21] studies purification of copper melt from the tin and lead impurities during vacuum melting followed by directed crystallization. However, such elements as Fe, Cr, and Co, cannot be removed by evaporation during vacuum melting.

Paper [22] describes the effectiveness of FR with addition of Cu₃P, which allows to obtain purer copper. Haque method can be considered as FR variant, which lies in purification of copper wire scrap from insulating material via treatment in induction furnaces [23].

ER is used for making of high purity copper. After FR, copper to for ER is cast into metal plates that are loaded into electrolytic baths as the anode. Electrolysis is conducted in electrolyte containing sulfuric acid and copper sulfate. Impurities that are more negative than copper dissolve into electrolyte but are not reduced at cathode, more positive impurities remain at anode as residue.

In regards to ER, existing works are directed towards optimization and modeling of the process, but not towards expanding its application. Theoretical and experimental studies of free convection and electrolyte layer separation are studied [24]; automatic regulation of copper ER process in [25]. In [26], modeling of ion flows during ER was studied, and the mathematical model of ion movement was developed. Paper [27] devoted to modeling ion behavior and reasons behind anode passivation. Utilization of arsenic which can occur in ER residue is touched in [28, 29].

For extraction of copper from salt waste, it is proposed to transform copper into CuO, followed by the dissolution of oxide in sulfuric acid and electroextraction with gradual [30].

Considering that problem of processing copper-based waste with the iron content of 10% and more are not studied in recent works, aim of the work was to study possibility of processing CPRI into high purity copper by means of ER using CPRI as anode.

Material and method

Base electrolyte (BE) used in experiments was electrolyte that is widely for electrorefining of copper, g/L: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 150, \text{H}_2\text{SO}_4 - 200$ [31, 32], prepared using analytical grade reagent. Analytical grade $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ was used as iron source for model solutions.

Corrosion rate and current yield (CY) during electrolysis were measured gravimetrically. A setup was used to measure CY, in which stabilized power source, electrolysis cell, copper coulometer and milliammeter connected in series. Copperplate was used as cathode.

Qualitative analysis of simultaneous reactions of cathodic reduction of Cu^{2+} and Fe^{3+} was conducted using potentiodynamic method (potentiostat P-30, PC-Pack software was used to record cathodic curves).

X-ray fluorescence (XRF) analyst (EDX-720 Shimadzu) was used to study the composition of CPRI, dynamics of iron content in electrolyte during prolonged electrolysis, purity of refined copper.

Results and discussion

During electrolysis, CPRI can anodically dissolve forming Cu^{2+} and Fe^{2+} ions. Divalent iron ions cannot be reduced at copper cathode, due to standard potential of



equal to -0.44 V, which is significantly more negative than that of



equal to +0.337 V [14]. However, when Fe^{3+} appear in solution, they can be reduced at the cathode:



This is because rather positive standard potential of reaction (3), equal to + 0.771 V [14]. Formation of Fe^{3+} is possible due to diffusion of oxygen into electrolyte, result ion into reaction



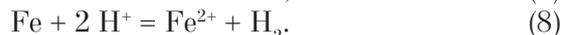
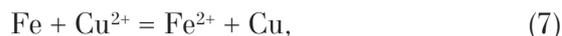
Presence of Fe^{3+} in electrolyte reduces cathodic current yield (CY), and increasing anodic CY due to reaction



if powder is kept in electrolyte without current supply, both its copper (reaction (5)) and iron part dissolve,



However, prior to formation of Fe^{3+} , when powder is introduced to solution its iron part reacts with $\text{Cu}^{2+}, \text{H}^+$ ions:



To model simultaneous occurrence of anodic dissolution of iron and copper experiments were conducted with addition iron (DC01 steel by European ranging) and Cu-ECP copper plates connected in parallel as anodes. Individual ammeters were connected in circuits of copper and iron anodes. Cathodic current density 1 A/dm², electrolysis time – 0.5 h, total current – 90 mA (set with rectifier). Iron anode was submerged in BE under load and removed also under load. This was done to avoid errors due to reaction of metallic iron with electrolyte without current since cementation can occur during this time (reaction 7).

Iron anode removed under load had red color. This indicated that chemical dissolution due to cementation occur simultaneously with anodic dissolution.

Ratios between anodic and cathodic currents were 14.2; 5.57; 3.46; 3.29 and 3.29, after 1, 3, 10, 20 and 30 min of electrolysis respectively. This is due to high reactivity of iron (more negative potential than copper). Decrease in current ratio is explained by shielding of iron surface due to cement copper.

To evaluate ratio between iron consumed by cementation and anodic dissolution, the anode was weighted before and after electrolysis, and also after removal of cement copper from the sample. The cement copper was removed using fastacting solution, g/L: $\text{CrO}_3 - 200, (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - 80$ [33]. It was previously established to not dissolve iron.

Consider weight anodically dissolved copper and weight increase on coulometer cathode CY for anodic dissolution of copper and iron is 22.6 and 77.4% respectively. Total weight loss of iron allowed to calculated ration between anodically dissolved and cemented iron (78.5 and 21.5%).

The occurrence of cementation during anodic dissolution of CPRI leads to redistribution of iron as cementing metal, additional accumulation of iron in electrolyte, and shielding

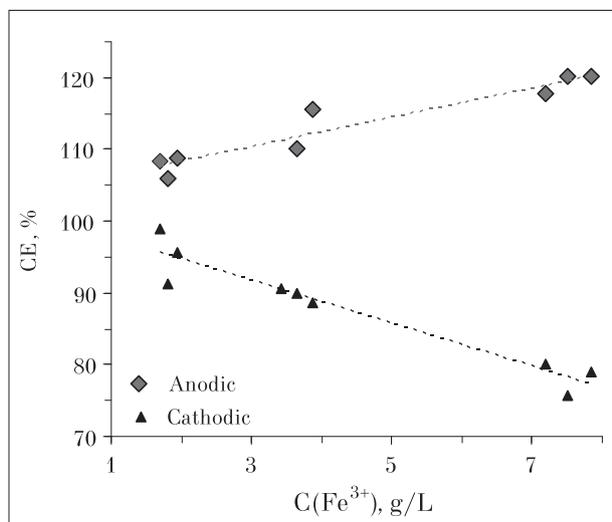


Fig. 1. Dependence of the current efficiency on the concentration of Fe³⁺ ions

of iron surface with cement copper. Regardless of mechanism of iron consumption, when 1 g/L Fe²⁺ of iron transfer to electrolyte, concentration of Cu²⁺ decreased by 1.138 g/L (1.138 – atomic mass ratio of Cu and Fe).

In practice, during electrorefining of CPRI, there can be situation when both electrodes remain in solution without current load. As such, additional experiments were conducted to evaluate rates of few chemical reactions. For dissolution of copper in BE with addition of 8 g/L Fe³⁺ corrosion current $i = 0.184 \text{ A/dm}^2$; for cementation of copper on iron in BE $i = 5.06$ and 1.45 A/dm^2 (for duration of 0.5 and 5 min respectively); dissolution of iron in H₂SO₄ (200 g/L) $i = 0.109 \text{ A/dm}^2$.

The higher reaction rate is observed for copper cementation. As such due to fast blockage of

the iron surface with cement copper, the influence of reaction (8) can be ignored.

Accumulation of large amounts of Fe³⁺ in BE can lead to significant losses of cathodically deposited copper. As such during electrolysis breaks, the cathode must be removed from electrolysis bath.

Experimental results on the influence of Fe³⁺ concentration on CY are shown in Figure 1. The graph was plotted considering that during electrolysis (20 min at 1 A/dm²), the Fe³⁺ concentration is also reduced due to reactions (3) and (5). As such, calculated CY values are related to average Fe³⁺ concentration during electrolysis.

Decrease of cathodic copper CY and increase of anodic copper CY are proportional to Fe³⁺ in electrolyte, with negative effect of iron(III) on electrode process being about the same.

Influence of Fe³⁺ in BE on the cathodic process was studied potentiodynamically (Fig. 2). The stationary potential of copper electrode (about +110 mV vs Ag/AgCl) turned out to be the same for solutions with Fe³⁺ and without it, which can be explained by low exchange currents for reaction (3).

Polarization curves (PC) on elevation region in solution with and without Fe³⁺ are almost identical. As such, this part of PC cannot be used to evaluate the contribution of reaction (3) to cathodic process. At the same time, increase in maximum on PC recorded in solution with addition of Fe³⁺ in comparison to those recorded in BE, indicate concurrent occurrence of reaction (2) and (3), when Fe³⁺ is present in electrolyte.

The assumption about low exchange current of reaction (3), allows expecting lower effect of

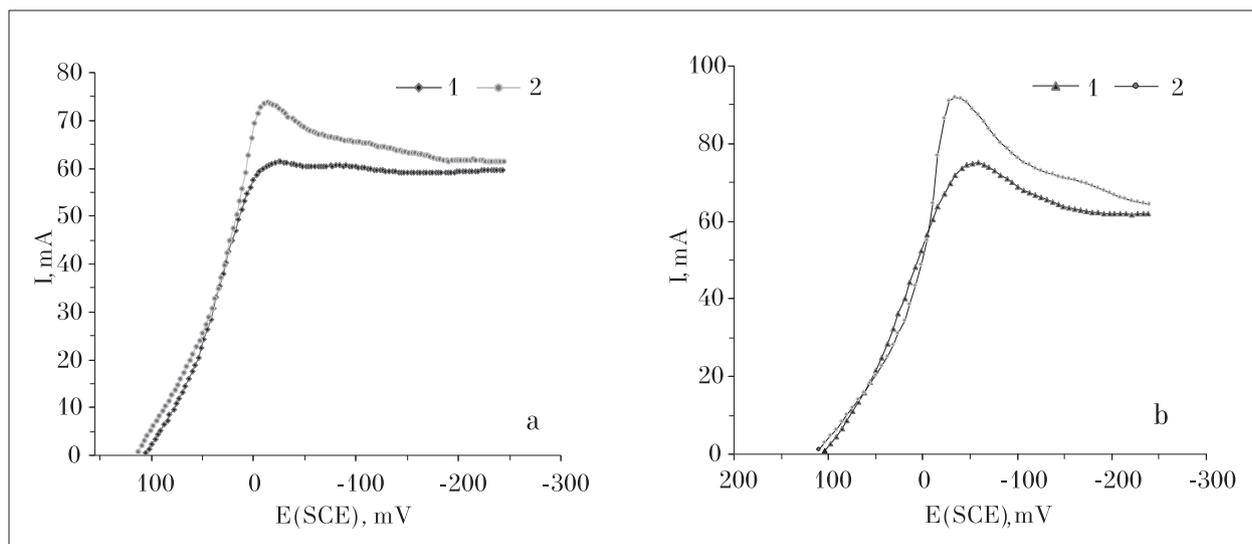


Fig. 2. Cathode potentiodynamic graphs, taken in BE (1) and in BE with the addition of Fe³⁺ ions 8 g/L (2). Rate of potential change, mV/s: a – 5; b – 10

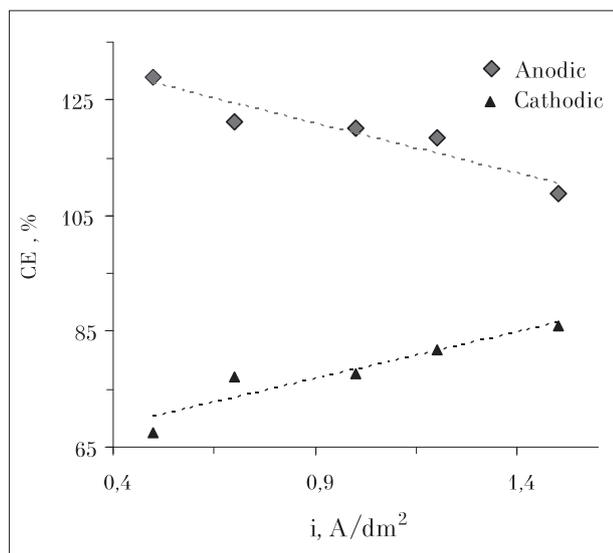


Fig. 3. Effect of current density on current effectiveness

Fe³⁺ at higher working current densities. As such, for BE with Fe³⁺ 8 g/L, influence of current density on cathodic and anodic CY was studied (Fig. 3). The results confirm expected effect, as such it is rational to conduct electrolysis at higher cathodic current densities.

A future of CPRI as initial material for processing into copper is its disperse state. Because of that, experiments with CPRI were conducted inside perforated titanium alloy current collector (basket), which was placed into a microporous polypropylene jacket. Such setups are used in galvanic to make powder anode [34].

In preliminary tests involving BE and basket current collector from WT1 titanium alloy, a significant increase in voltage (up to 10–30 V) was observed, which is due to high transition voltage at dispersing MPRI – titanium oxide film.

It is known the method to activate titanium WT1 alloy with the solution of HNO₃: HF (2: 1) [35]. But because this solution is dangerous, it was decided to add NaF (30 g/L) to BE, to depassivate titanium. After this modification, the voltage in further experiments did not exceed 4 V.

In separate experiments it was found, that addition of NaF to BE containing Fe³⁺ improved cathodic CY by few percents when refining CPRI. This effect can be attributed to partial complexing of trivalent iron into [FeF₄]⁻, [FeF₅]²⁻ and [FeF₆]³⁻ [36], which have difficulty for migrating towards the negatively charged cathode. It was also found that introduction of NaF, does not affect corrosion rate of copper.

A long-term (5 stages with breaks) electrorefining of CPRI experiment was conducted on a laboratory scale. Working cathode area

was 0.42 dm², cathodic current density was varied from 1 to 2 A/dm². CPRI load was 188 g. 850 mL of BE with addition of NaF (30 g/L) was used. Electrode distance was 5.5 cm. Based on experimental results, cathodic CY (95.4%) and average specific power consumption (1.44 (kW · h)/kg of copper). The purity of cathodically deposited copper was measured by XRF, according to which it corresponds to M0k copper (GOST 859-2014 Copper. Grades), or Cu-ECP grade by European specification.

After each electrolysis stage electrolyte samples were taken for XRF analysis to measure Fe buildup in the electrolyte. After current consumption of 0.75; 3.85; 6.65; 9.63 and 12.1 A · h/L, the Fe/Cu ratio in electrolyte was 0.025; 0.052; 0.074; 0.11 and 0.123.

The higher rate of Fe buildup is observed on stage 1. This is because upon placing the electrode into solution significant amount of iron in copper powder partakes in cementation i.e. the major part of iron buildup occurs due to chemical reaction and not anodic dissolution. On subsequent stages (2–5), iron buildup is gradual, proportional to passed current due to anodic dissolution of iron from powder.

Conclusion

Possibility of processing copper powder containing 1.6–12.2% iron by means of electrorefining has been studied. This powder is formed during processing of copper-containing waste of galvanic plants by cementation and finds no use. It was found that electrorefining of dirty copper powder in sulfuric acid electrode results in high purity copper that matches Cu-ECP grade. Technological recommendations were proposed for conducting the process, namely method for depassivating titanium current collector.

It was found, that in addition to the anodic dissolution of copper and iron from powder, iron part undergoes dissolution due to cementation of copper. Influence of Fe³⁺ ions in electrolyte on rate of chemical and electrochemical reaction was studied in experiments with model solution. It was found that negative effect of Fe³⁺ on cathodic reduction of copper can be reduced by introduction to NaF to electrolyte and increase of cathodic current density.

References

1. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 2.

P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-019

2. Sanitary rules and regulations 2.1.4.1074-01. “Drinking water. Hygienic requirements for the quality of water from centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems” [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/902156582> (Accessed: 01.06.2019) (in Russian).

3. Eremina E.Ju. Wilson-Konovalow disease // *Vestnik sovremennoy klinicheskoy meditsiny*. 2011. V. 4. No. 1. P. 38–46 (in Russian).

4. Brewer G.J. Copper excess, zinc deficiency, and cognition loss in Alzheimer’s disease // *BioFactors*. 2012. V. 38 (2). P. 107–113. doi: 10.1002/biof.1005

5. Coenen I.C.J., Houwen R.H.J. Indian childhood cirrhosis and other disorders of copper handling // *Clinical and Translational Perspectives on WILSON DISEASE*. Chennai: Academic Press, 2019. P. 449–453. doi: 10.1016/b978-0-12-810532-0.00044-6

6. Adrianovskiy V.I., Lipatov G.Ya., Konstantinov V.G. On assessment of carcinogenic risk to employees engaged in the production of copper powder // *Zdorovye i obrazovanie v XXI veke*. 2011. V. 13. No. 2. P. 168–196 (in Russian).

7. Brewer G.J. Copper toxicity in the general population // *Clinical Neurophysiology*. 2010. V. 121 (4). P. 459–460. doi: 10.1016/j.clinph.2009.12.015

8. Vinogradov S.S. Ecologically safe galvanic production. Moskva: Globus, 1998. 304 p. (in Russian).

9. Order of the ministry of agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 No. 552. On approval of water quality standards for reservoirs of fisheries value, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in water bodies of fisheries value [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/420389120> (Accessed: 01.06.2019) (in Russian).

10. McBride M.B., Blasiak J.J. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acid soil // *Soil Science Society of America*. 1979. V. 43. No. 5. P. 866–870. doi: 10.2136/sssaj1979.03615995004300050009x

11. Cavallaro N., McBride M.B. Zinc and copper sorption and fixation by an acid soil clay: effect of selective dissolutions // *Soil Science Society of America*. 1984. V. 48. No. 5. P. 1050–1054. doi: 10.2136/sssaj1984.03615995004800050020x

12. Wentzel R.S., Guelt M.A. Toxicity of brass powder in soil to the earthworm *lumbricus terrestris* // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1987. V. 6. P. 741–745. doi: 10.1897/1552-8618(1987)6[741:TOB-PIS]2.0.CO;2

13. Bobovich B.B. Industrial waste recycling. Moskva: SP Internet Inzhiniring, 1999. 445 p. (in Russian).

14. Handbook of electrochemistry / Ed. A.I. Sukhotin. Leningrad: Khimiya, 1981. 488 p. (in Russian).

15. Alkatsev M.I. Cementation processes in non-ferrous metallurgy. Moskva: Metallurgiya, 1981. 116 p. (in Russian).

16. Kalugina N.L., Varlamova I.A., Kalugin D.A., Varlamova N.A. Cementation extraction of copper from solutions and various materials // *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2013. V. 1. No. 71. P. 323–326 (in Russian).

17. Shia C., Meyer C., Behnoode A. Utilization of copper slag in cement and concrete // *Resources, Conservation and Recycling*. 2008. V. 52. No. 10. P. 1115–1120. doi: 10.1016/j.resconrec.2008.06.008

18. Bredikhin V.N. Recycled copper. Donetsk: DonNTU, 2006. 416 p. (in Russian).

19. Vol’khin A.I. Refining of copper with increased nickel content with the help of silicon-containing reagents // *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya Metalurgiya*. 2005. No. 3. P. 4–9 (in Russian).

20. Liao Y., Zhou J., Huang F. Separating and recycling of Fe, Cu, Zn from dumped copper slag by microwave irradiation assisted carbothermic method // *Journal of Residuals Science & Technology*. 2016. V. 13. P. 155–160.

21. Naumik V.V. Development of theoretical basis for the purifying at copper waists processing // *New materials and technologies in metallurgy and machine-building*. 2011. No. 2. P. 57–60 (in Russian).

22. Tsygankova O.V. Precision affinage of copper from crow-bar and wastes // *Technological audit and production reserves*. 2013. No. 5/4 (13). P. 32–34 (in Russian).

23. Haque M.M., Kim H., Kong M-S., Hong H-S., Kim K-S., Lee C.S. Recycling copper from waste copper wire using an applied voltage // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2012. V. 13. No. 7. P. 1251–1254. doi: 10.1007/s12541-012-0167-3

24. Eklund A., Alavyoon F., Simonsson D., Karlsson R.I., Bark F.H. Theoretical and experimental studies of free convection and stratification of electrolyte in a copper refining cell // *Electrochimica Acta*. 1991. V. 36. No. 8. P. 1345–1354. doi: 10.1016/0013-4686(91)80015-Z

25. Gron D.N., Gorensky B.M. Information-operating system process of electrolytic refinement of copper // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2009. No. 3. P. 304–310 (in Russian).

26. Mitin K.V., Lyubanova A.Sh. Modeling of the flows of ions in the course of electrolytic refinement by the method of particles // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013. No. 5. P. 527–533 (in Russian).

27. Abe S., Burrows B.W., Ettl V.A. Anode passivation in copper refining // *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*. 1980. V. 19. No. 3. P. 289–296. doi: 10.1179/cmj.1980.19.3.289

28. Dutré V., Vandecasteele C. Solidification/stabilisation of hazardous arsenic-containing waste from a copper refining process // *Journal of Hazardous Materials*. 1995. V. 40. No. 1. P. 55–68. doi: 10.1016/0304-3894(94)00080-Z

29. Fernández M.A., Segarra M., Espiell F. Selective leaching of arsenic and antimony contained in the anode slimes from copper refining // Hydro-metallurgy. 1996. V. 41. No. 2–3. P. 255–267. doi: 10.1016/0304-386X(95)00061-K

30. Bobrov M.N., Goreva T.V., Khranilov Yu.P. Product quality stabilization at electrolysis on exhaustion in utilization processes of concentrated wastes of galvanic productions // Chemistry and chemical technology. 2009. V. 12. No. 52. P. 50–52 (in Russian).

31. Kozlov V.A. Copper refining. Moskva: Metallurgiya, 1992. 267 p. (in Russian).

32. Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper: international series on materials science and technology. London: Elsevier Science, 2013. 427 p.

33. Kotik F.I. Accelerated control of electrolytes, solutions, and melts. Moskva: Mashinostroeniye, 1978. 191 p. (in Russian).

34. Dasoyan M.A. Equipment for electrochemical coating workshops. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979. 287 p. (in Russian).

35. Gorynin I.V., Chechulin B.B. Titan in machine building. Moskva: Mashinostroeniye, 1990. 400 p. (in Russian).

36. Lurye Yu.Yu. Handbook of analytical chemistry. Moskva: Khimiya, 1971. 456 p. (in Russian).

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие в работе
**XV Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием «Экология родного края:
проблемы и пути их решения»,**

которая будет проводиться в г. Кирове 16 апреля 2020 г.

Конференцию организуют и проводят
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» совместно
с Институтом биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН.

Присланные материалы будут опубликованы в сборнике материалов конференции. Сборник материалов будет включён в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Электронная версия издания будет размещена в базе электронной библиотеки www.elibrary.ru.
Сборнику статей будет присвоен ISBN.

Электронная версия сборника материалов конференции в формате pdf будет размещена на сайте конференции <http://envjournal.ru/confer/sbr.php>

**Конференция будет проводиться в online-формате
16.04.2020 г. с 10:00–15:00 (время московское).**

В ходе конференции будет проводиться online-трансляция докладов, которые были заявлены авторами как пленарные. Программа конференции будет размещена на сайте <http://envjournal.ru/confer/cnf.php>.

К конференции могут присоединиться все желающие и задать вопросы докладчикам. Участникам online-конференции будут выданы сертификаты.

Условия подключения для участия в конференции будут размещены на сайте <http://envjournal.ru/confer/cnf.php>

Приглашаем всех принять участие в конференции!!!

*С уважением,
Организационный комитет конференции*

Применение продуцирующих ауксины бактерий при фиторемедиации загрязнённой нефтью почвы

© 2020. М. Д. Бакаева, к. б. н., с. н. с., Е. В. Кузина, к. б. н., с. н. с., Г. Ф. Рафикова, к. б. н., с. н. с., Л. Б. Высоцкая, д. б. н., в. н. с., Т. Н. Архипова, к. б. н., с. н. с., З. А. Ахтямова, аспирант, С. П. Четвериков, д. б. н., в. н. с., О. Н. Логинов, д. б. н., профессор, в. н. с., Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, д. 69, e-mail: biolab316@yandex.ru

Растительно-микробные ассоциации эффективны для рекультивации загрязнённых нефтью почв. При этом значение уровня продукции бактериями фитогормонов и влияние нефтяных углеводородов на проявление бактериями стимулирующего эффекта остаются недостаточно изученными.

Исследования проводили в условиях модельного эксперимента с растениями ячменя *Hordeum vulgare* L., выращенного на загрязнённой нефтью песчано-почвенной смеси в условиях искусственного освещения. Внесённые в почву штаммы бактерий *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D, *P. hunanensis* IB C7, *P. extremaustralis* IB K2, *Enterobacter asburiae* IB UOM3 были способны к деструкции углеводородов и синтезу индолилуксусной кислоты.

Использование бактерий позволило улучшить на 10–33% выживаемость растений ячменя на фоне нефтяного загрязнения. В присутствии углеводородов проявлялась адаптивная реакция, заключающаяся в увеличении массы корневой системы. Обработка ячменя бактериями усиливала проявление данной реакции, причём, при большем загрязнении эффект был сильнее. Стимуляция роста корней внесёнными штаммами микроорганизмов сопровождалась интенсификацией разложения нефти в почве. Скорость деградации углеводородов возрастала в ряду: ячмень, бактерии, ассоциации ячменя с бактериями. В вариантах опыта с ассоциациями содержание углеводородов в почве за 21 сутки снижалось на 45,0–51,2% и 37,5–41,9% при нефтяном загрязнении 40 и 80 г/кг, соответственно.

Ключевые слова: рекультивация, нефть, бактерии, индолилуксусная кислота, ячмень, стимулирование роста растений.

Application of auxin producing bacteria in phytoremediation of oil-contaminated soil

© 2020. M. D. Bakaeva ORCID: 0000-0001-8738-4534, E. V. Kuzina ORCID: 0000-0002-6905-0108, G. F. Rafikova ORCID: 0000-0001-7655-5588, L. B. Vysotskaya ORCID: 0000-0001-9348-9316, T. N. Arkhipova ORCID: 0000-0002-6971-1084, Z. A. Ahtyamova ORCID: 0000-0002-3495-0501, S. P. Chetverikov ORCID: 0000-0002-7961-1503, O. N. Loginov ORCID: 0000-0002-7875-7295, Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 69, Prospekt Oktyabrya, Ufa, Russia, 450054, e-mail: biolab316@yandex.ru

Plant-microbial associations are effective for the remediation of oil-contaminated soils. At the same time, the level of production of phytohormones by bacteria and the effect of petroleum hydrocarbons on the manifestation of the stimulating effect by bacteria remain insufficiently studied.

The studies were carried out in a model experiment with plants of *Hordeum vulgare* L. grown on oil-contaminated sand-soil mixture in artificial lighting. The soil mixture was treated with 10⁵ CFU/g of bacteria *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D, *P. hunanensis* IB C7, *P. extremaustralis* IB K2, *Enterobacter asburiae* IB UOM3. Bacterial strains were able to destroy hydrocarbons and synthesize indoleacetic acid.

By the end of the experiment in the variant polluted with 80 g of oil per 1 kg of soil the number of living plants fell to 67%. The addition of growth-stimulating strains of oil destructors significantly improved the survival of barley plants. The mass of the barley root system was the most sensitive to oil pollution and introduction of bacteria. In the presence of hydrocarbons, a useful adaptive reaction was manifested; it consisted in increasing the mass of the root system. Treatment of barley by bacteria increased the manifestation of this reaction. The introduced bacteria increased the growth of

roots more significantly against the background of 80 g/kg than 40 g/kg oil pollution. The revealed stimulation of root growth by microorganisms' introduction accelerated oil decomposition in the soil. Inoculation of contaminated soil with oil destructor strains together with barley plant cultivation reduced pollutant content by 45.0–51.2% and 37.5–41.9% for 21 days (at initial concentration of 40 g/kg and 80 g/kg, respectively). The rate of hydrocarbons' degradation was increased in the row: plant, bacteria, association plant + bacteria.

Keywords: remediation, oil, bacteria, indolylacetic acid, barley, plant growth promoting.

Среди разных подходов к восстановлению загрязнённых нефтью земель биоремедиация выгодно отличается своей эффективностью, стоимостью и экологической безопасностью. В рекультивационных мероприятиях могут быть задействованы штаммы микроорганизмов (МО), обладающие деструктивной способностью в отношении загрязняющих веществ, высшие растения или ассоциативные растительно-микробные комплексы [1].

Растительно-микробные ассоциации имеют преимущества при выживании в неблагоприятных условиях в силу взаимовыгодного сосуществования [2]. Положительное воздействие инокуляции растения-фитомелиоранта бактериальными штаммами выражается в увеличении зелёной массы [3], уменьшении проявления у него признаков стресса [4] и ускорении деструкции углеводов в почве [5, 6]. Некоторые исследователи связывают способность использованных для инокуляции растений штаммов бактерий к стимуляции роста растений в условиях углеводородного загрязнения с синтезом фитогормонов, как правило, индолилуксусной кислоты (ИУК) [7]. При этом вопрос о том, какое влияние оказывает присутствие нефтяных углеводов на проявление ростстимулирующего эффекта остаётся недостаточно изученным.

Целью работы было изучение влияния интродукции окисляющих углеводороды МО, продуцирующих ИУК, на рост ячменя и деструкцию нефти в загрязнённой почве.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в условиях модельного эксперимента с растениями ячменя *Hordeum vulgare* L. сорта Челябинский 99, выращенного на песчано-почвенной смеси. Для этого воздушно-сухую почву, просеянную через сито (диаметр отверстий 0,3–0,5 см), смешивали с песком в соотношении 9:1, вносили навески нефти (плотность 0,905 г/см³, содержание общей серы 1,6%) соответствующие 40 г/кг, 80 г/кг почвы и тщательно перемешивали. Песчано-почвенную смесь (далее по тексту почвенная смесь) массой 0,45 кг помещали в вегетационные сосуды и увлажняли до 80%

от полной влагоёмкости (ПВ). Для оптимизации водно-воздушного режима почвенной смеси использовали дренаж и стеклянную трубку. В подготовленные сосуды высаживали двухсуточные проростки ячменя. С целью ускорения разложения нефти почвенную смесь проливали разбавленной жидкой культурой бактерий, из такого расчёта, чтобы титр клеток составил не менее 10⁵ КОЕ/г почвы. По истечении двух недель с начала эксперимента проводилось повторное внесение жидкой культуры. На протяжении всего эксперимента поддерживали влажность почвенной смеси на уровне 70–80% от ПВ. Растения выращивали в условиях искусственного освещения (100 мкмоль/(м² · с)) с 14-часовым фотопериодом при температуре 22–26 °С в течение трёх недель. Контролем служил вариант почвенной смеси без внесения растений и МО.

Для обработки почвенной смеси использовали штаммы бактерий из коллекции МО Уфимского Института биологии УФИЦ РАН *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D, *P. hunanensis* IB C7, *P. extremaustralis* IB K2, *Enterobacter asburiae* IB UOM3. Штаммы характеризовались наличием комплекса свойств, необходимых для проведения эффективной биоремедиации: способностью к деструкции углеводов и фитогормональной активностью [8]. На среде Кинг Б [9] штаммы продуцировали 0,3–11,5 мкг/мл ИУК.

Культуру для инокуляции почвенной смеси получали путём культивирования штаммов бактерий на жидкой питательной среде Кинг Б в колбах Эрленмейера на термостатируемом шейкере (160 об./мин) при температуре 28 °С в течение 72 часов.

Численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) в почве определяли методом высева разведений почвенной суспензии на агаризованную питательную среду Раймонда с дизельным топливом в качестве источника углерода [10]. Содержание нефтепродуктов в почве устанавливали гравиметрически по ПНД Ф 16.1.41-04. Образцы почвенной смеси для анализа отбирали на 1-е и 21-е сутки после постановки эксперимента.

У ячменя оценивали такие показатели как отношение числа не погибших к концу экс-

перимента к числу появившихся на 3 сутки из почвы растений (выживаемость), сырую массу проростков, сырую массу корней и длину листьев.

Статистическую обработку данных проводили по стандартным программам MS Excel. На рисунках и в таблицах представлены средние арифметические ± стандартные ошибки средних арифметических. Достоверность различий оценивали по t-критерию Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Интенсивность деградации углеводов возрастала в ряду: растение, бактерия, ассоциация растение + бактерия (табл.). Установлено, что инокуляция загрязнённой почвы штаммами-нефтедеструкторами совместно с выращиванием растений ячменя способствовала уменьшению содержания в ней поллютанта на 45,0–51,2 и 37,5–41,9% (при содержании нефти 40 и 80 г/кг соответственно). Использование тех же штаммов, но в отсутствие растения-фиторемедианта привело к снижению эффективности биорекультивации в среднем на 5,0–9,5%. При использовании только ячменя без дополнительного внесения бактерий остаточное содержание нефтепродуктов достоверно не отличалось от контроля.

В почве, загрязнённой 40 г/кг нефти, штаммы демонстрировали сопоставимую деструктивную активность как в вариантах опыта с ячменем, так и без него. При содержании нефти 80 г/кг в почве без растений наилучшие результаты были достигнуты с использованием штамма *P. plecoglossicida* 2,4-D. Однако, в присутствии ячменя эффективность применения штаммов *P. hunanensis* IB C7, *E. asburiae* IB UOM3 также достоверно возрастала.

Созданный в лабораторных условиях благоприятный водный и температурный режим способствовал существенному росту в загрязнённой почве числа аборигенных МО, способных использовать углеводороды в качестве единственного источника углерода. К окончанию эксперимента их численность возросла на 2 порядка по сравнению с исходной $(2-5) \cdot 10^5$ КОЕ/г и достигла через три недели эксперимента $(4-6) \cdot 10^7$ КОЕ/г. Интродукция углеводородокисляющих штаммов лишь немного увеличивала данный показатель. Посев растений ячменя способствовал значительному повышению численности углеводородокисляющих МО в почве ризосферы до $(2,5-3,4) \cdot 10^8$ КОЕ/г. Варианты с внесением и без внесения исследуемых штаммов отличались несущественно, в то время как скорость разложения углеводов в них не была

Таблица / Table
Биодеструкция нефти при различных вариантах рекультивации (21-е сутки эксперимента)
Biodegradation of oil in various remediation options (21 days of the experiment)

Вариант опыта The variant of the experiment	Исходное содержание нефти в почве, г/кг Initial oil content in soil, g/kg			
	40	80	40	80
	остаточные углеводороды, г/кг Residual hydrocarbons, g/kg		численность углеводородокисляющих микроорганизмов, КОЕ/г • 10 ⁷ Number of hydrocarbon-oxidizing microorganisms, CFU/g • 10 ⁷	
Контроль / Control	28,9±1,4 ^a	59,0±1,5 ^a	4±1 ^a	6±1 ^a
<i>E. asburiae</i> IB UOM3	23,3±0,9 ^{bc}	54,2±1,3 ^b	10±3 ^b	13±3 ^b
<i>P. extremaustralis</i> IB K2	24,0±0,8 ^b	54,7±1,9 ^{ab}	11±2 ^b	15±4 ^b
<i>P. plecoglossicida</i> 2,4-D	23,0±0,9 ^{bc}	47,9±1,6 ^c	14±3 ^b	14±4 ^b
<i>P. hunanensis</i> IB C7	23,3±0,9 ^{bc}	52,6±1,7 ^b	12±3 ^b	15±3 ^b
<i>H. vulgare</i>	25,2±1,2 ^{ab}	56,2±2,0 ^{ab}	28±5 ^c	26±4 ^c
<i>H. vulgare</i> + <i>E. asburiae</i> IB UOM3	20,8±1,0 ^c	48,3±1,8 ^c	32±5 ^c	28±4 ^c
<i>H. vulgare</i> + <i>P. extremaustralis</i> IB K2	22,0±1,2 ^{bc}	50,0±1,8 ^{bc}	27±4 ^c	25±3 ^c
<i>H. vulgare</i> + <i>P. plecoglossicida</i> 2,4-D	20,6±1,2 ^c	47,0±1,5 ^c	33±5 ^c	30±5 ^c
<i>H. vulgare</i> + <i>P. hunanensis</i> IB C7	19,5±1,3 ^c	46,5±1,7 ^c	31±4 ^c	34±6 ^c

Примечание: достоверно отличающиеся значения помечены разными буквами (p ≤ 0,05, t-тест).
Note: significantly different means are marked with different letters (p ≤ 0.05, t-test).

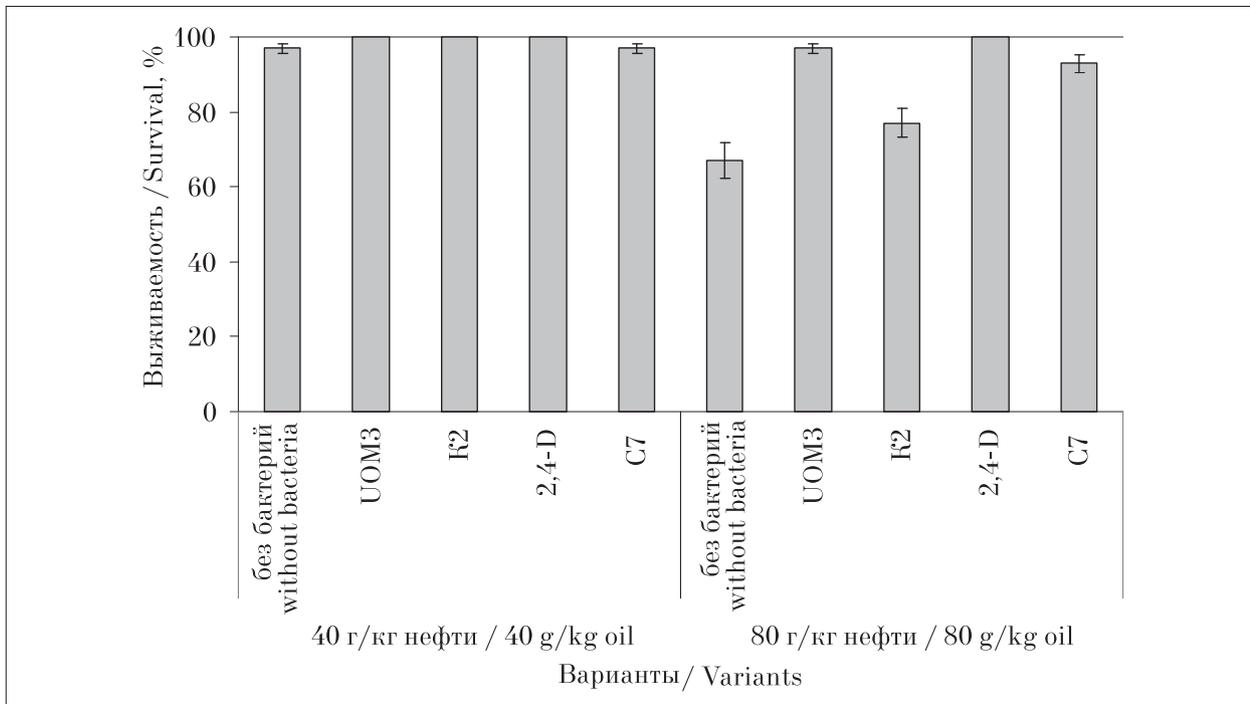


Рис. 1. Влияние интродукции бактерий на выживаемость растений ячменя при различных уровнях нефтяного загрязнения
Fig. 1. Effect of bacterial introduction on survival of barley plants at different levels of oil pollution

одинаковой. Таким образом, для биодеструкции углеводов имеет значение не только факт проявления ризосферного эффекта, но и то, с какими штаммами МО было ассоциировано растение.

По литературным данным ячмень относится к числу культур устойчивых к нефтяному загрязнению [11]. Действительно, загрязнение почвы нефтью в дозе 40 г/кг практически не вызывало гибель проростков, тогда как в варианте опыта с внесением 80 г нефти на 1 кг почвы выживаемость растений к концу эксперимента составляла лишь 67%. С другой стороны, при той же дозе загрязнителя (80 г/кг), но с добавлением ростстимулирующих штаммов-нефтедеструкторов процент выживших растений через три недели эксперимента был выше на 10–33%, т. е. в некоторых вариантах опыта не погибло ни одного растения (рис. 1). Причём, штамм *P. extremaustralis* IB K2 в меньшей степени способствовал выживанию растений ячменя на загрязнённой почве.

В ходе проведённых исследований установлено, что ингибирующему действию нефти более подвержена надземная часть ячменя. По сравнению с контрольными растениями, выращенными на незагрязнённой почве, масса побегов при концентрации нефти в почве 40 и 80 г/кг уменьшилась в 2,7 и 3,8 раза, соот-

ветственно (рис. 2). Отрицательное влияние нефти на формирование надземной части ячменя проявлялось также в замедлении скорости появления новых листьев, некротических поражениях листовых пластин. Так, к концу эксперимента (21 сутки) в вариантах с загрязнённой почвой растения успели образовать только два настоящих листа (в варианте без загрязнения – три).

В то же время, в присутствии 40 г/кг загрязнителя у растений отмечено значительное увеличение массы корня – на 30–50% по сравнению с ячменём, выращенным на незагрязнённой почве. Известно, что значительная активация роста корней по сравнению с побегом является характерной адаптивной реакцией растений на снижение доступности почвенных ресурсов [12]. Поскольку загрязнение почвы нефтью препятствует поглощению растением воды и минеральных солей [13], активация роста корней является способом преодоления существующего дефицита элементов питания. При увеличении концентрации углеводов в почве до 8% масса корней у растений уменьшалась по сравнению с почвой, не содержащей поллюганта. Таким образом, токсичное действие нефти в более высокой концентрации тормозило проявление адаптивной реакции у растений ячменя.

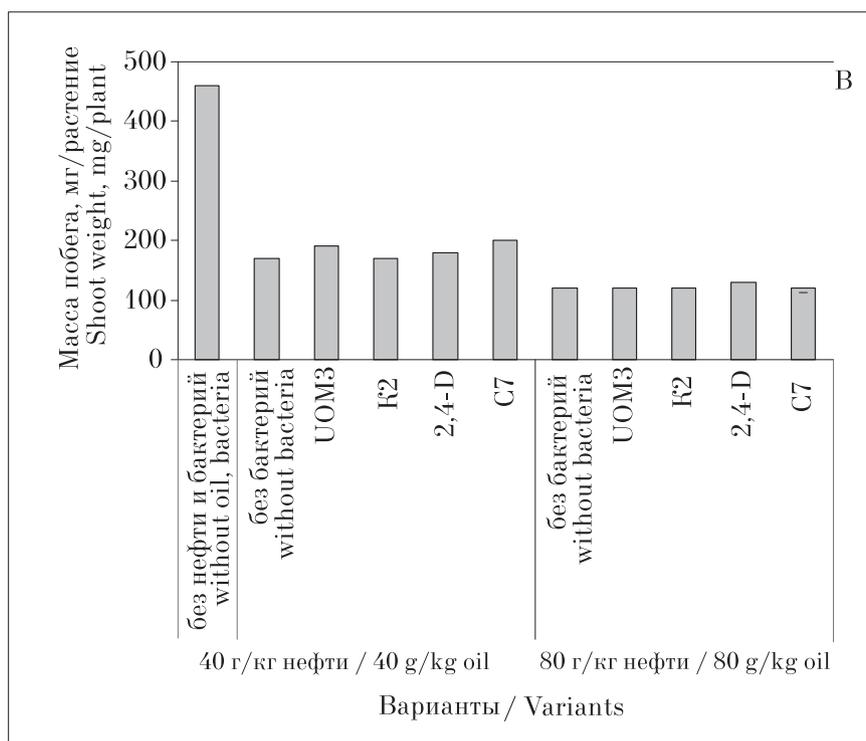
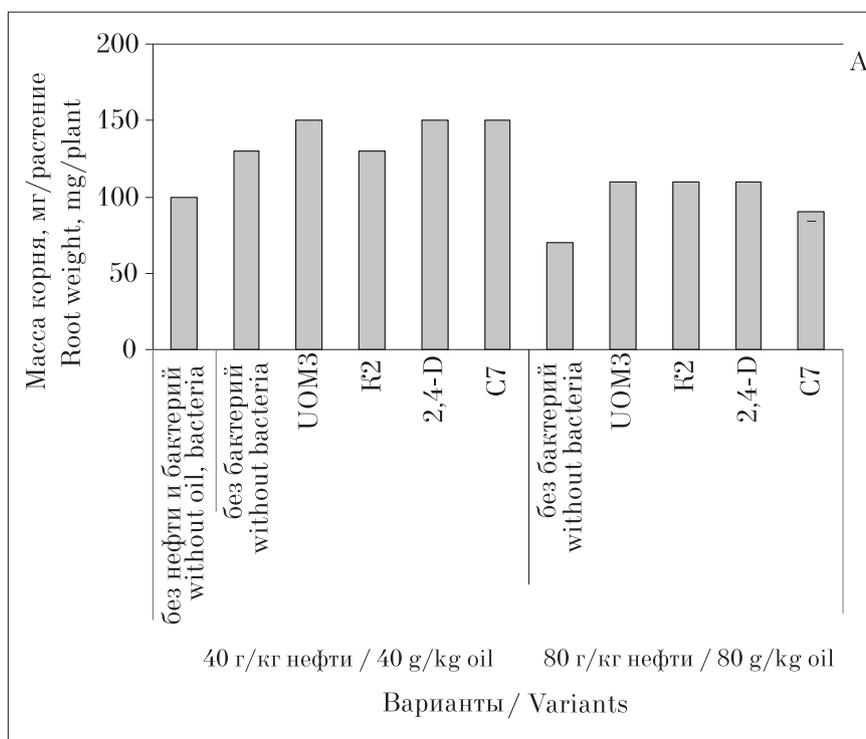


Рис. 2. Влияние нефтяного загрязнения на морфологические показатели ячменя: А – масса корня, В – масса побега

Fig. 2. The impact of oil pollution on morphological parameters of barley: A is the weight of the root, B is the weight of the shoot

Внесение бактерий в загрязнённую почву положительно влияло на морфологические показатели растений ячменя. В вариантах опыта с исходным уровнем загрязнения 40 г/кг использование штаммов *Enterobacter*

asburiae IB UOM3, *Pseudomonas hunanensis* IB C7 приводило к увеличению массы побега на 11,8–17,6%. Что касается длины листьев, достоверных отличий между контролем (только растение) и вариантами опыта (растение

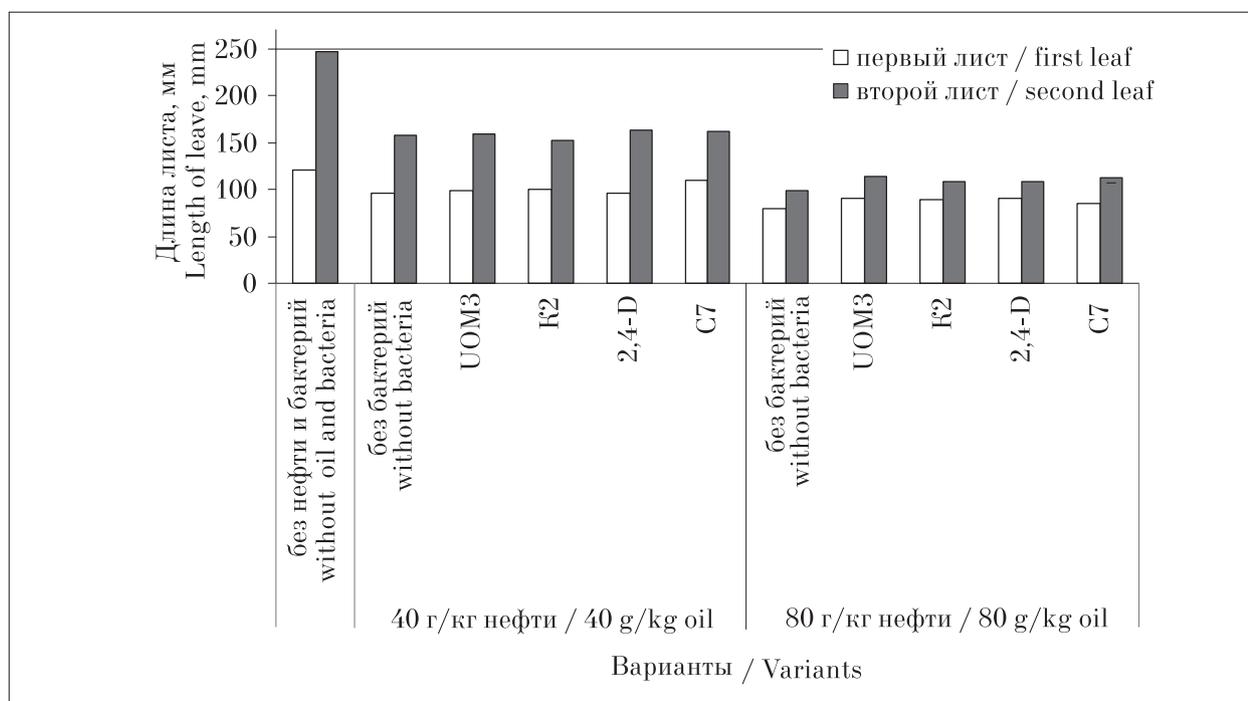


Рис. 3. Влияние нефтяного загрязнения на длину листьев ячменя
 Fig. 3. The impact of oil pollution on the length of barley leaves

+ бактерия) выявлено не было (рис. 3). При увеличении содержания углеводов до 80 г/кг почвы был замечен небольшой положительный эффект. Например, интродукция в ризосферу ячменя штамма *E. asburiae* IB UOM3 способствовала увеличению длины первого листа на 15,2%, второго – на 15,3%.

При обработке ячменя бактериями на фоне загрязнения нефтью 40 г/кг была отмечена тенденция к увеличению массы корней, однако отличия от загрязнённого варианта без внесения бактерий не были статистически достоверны при $p \leq 0,05$. Вместе с тем, с увеличением техногенной нагрузки до 80 г нефти на 1 кг почвы ростстимулирующий эффект на корни от применения бактерий становился более заметным и статистически значимым. Интродукция штаммов *E. asburiae* IB UOM3, *P. extremaustralis* IB K2, *P. plecoglossicida* 2,4-D способствовала увеличению массы корней растений в 1,5 раза по сравнению с вариантом без внесения МО. Ускорение роста корней может быть следствием воздействия экзогенных фитогормонов, синтезируемых МО [14]. Поскольку именно при загрязнении 80 г/кг отмечено достоверное положительное влияние бактериализации растений на скорость разрушения углеводов, можно сделать вывод, что стимуляция роста корней внесёнными штаммами МО способствовала ускорению рекультивации почвы.

Заключение

Таким образом, среди фиксированных в ходе эксперимента показателей наиболее чувствительной к интродукции бактерий оказалась масса корневой системы ячменя. Вносимые в почву способные к синтезу ИУК бактерии более существенно усиливали рост корней на фоне загрязнения нефтью в дозе 80 г/кг, чем в дозе 40 г/кг. Внесение под посевы ячменя штаммов *E. asburiae* IB UOM3, *P. plecoglossicida* 2,4-D, *P. hunanensis* IB C7 способствовало ускорению разложения нефти в почве на 14–23% по сравнению с растениями без интродукции бактерий.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-29-05025/18, ГЗ Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А19-119021390081-1 и № АААА-А18-118022190100-9 с использованием оборудования ЦКП УФИЦ РАН «Агидель».

References

- Domracheva L.I. Territory remediation with the help of organisms and biosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 4–16 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-004-016
- Agnello A.C., Bagard M., van Hullebusch E.D., Esposito G., Huguenot D. Comparative bioremediation of

heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation // Science of the Total Environment. 2016. V. 563–564. P. 693–703. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061

3. Hou, J., Liu W., Wang B., Wang Q., Luo Y., Franks A.E. PGPR enhanced phytoremediation of petroleum contaminated soil and rhizosphere microbial community response // Chemosphere. 2015. V. 138. P. 592–598. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.07.025

4. Wojtera-Kwiczor J., Zukowska W., Graj W., Małeczka A., Piechalak A., Ciszewska L., Chrzanowski Ł., Lisiecki P., Komorowicz I., Barakiewicz D., Voss I., Scheibe R., Tomaszewska B. Rhizoremediation of diesel-contaminated soil with two rapeseed varieties and petroleum degraders reveals different responses of the plant defense mechanisms // International Journal of Phytoremediation. 2014. V. 16. P. 770–789. doi: 10.1080/15226514.2013.856848

5. Tang J., Wang R., Niu X., Zhou Q. Enhancement of soil petroleum remediation by using a combination of ryegrass (*Lolium perenne*) and different microorganisms // Soil & Tillage Research. 2010. V. 110. P. 87–93. doi: 10.1016/j.still.2010.06.010

6. Korshunova T.Yu., Bakaeva M.D., Loginov O.N. Multifunctional biological products-oil destructors: effect on plants and soil oil content // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2018. V. 22. No. 9. P. 18–22 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-9-18-22

7. Cruz-Morales N.K., Rodríguez-Tovar A.V., Guerrero-Zúñiga L.A., Rodríguez-Dorantes A. Plant growth promoting characterization of soil bacteria isolated from petroleum contaminated soil // International Journal of Environmental & Agriculture Research. 2016. V. 2. No. 7. P. 15–21.

8. Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Stolarova E.V., Muchamatdyarova S.R., Kudoyarova G.R. Influence of bacteria-destructors of oil hydrocarbons on germination and growth of plants // Ekobiotech. 2019. V. 2. No. 2. P. 175–183. doi: 10.31163/2618-964X-2019-2-2-175-183

9. King E.O., Ward M.K., Raney D.E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // Journal of Laboratory and Clinical Medicine. 1954. V. 44. P. 301–307.

10. Raymond R.L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Development Industrial Microbiology. 1961. V. 2. P. 23–32.

11. Xu J.G., Johnson R.L. Nitrogen dynamics in soils with different hydrocarbon contents planted to barley and field pea // Canadian Journal of Soil Science. 1997. V. 77. P. 453–458. doi: 10.4141/S96-046

12. Kudoyarova G.R., Dodd I.C., Veselov D.S., Rothwell S.A., Veselov S.Y. Common and specific responses to availability of mineral nutrients and water // Journal of Experimental Botany. 2015. V. 66. P. 2133–2144. doi: 10.1093/jxb/erv017

13. Han G., Cui B.X., Zhang X.X., Li K.R. The effects of petroleum-contaminated soil on photosynthesis of *Amorpha fruticosa* seedlings // International Journal of Environmental Science and Technology. 2016. V. 13. P. 2383–2392. doi: 10.1007/s13762-016-1071-7

14. Patten C.L., Glick B.R. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system // Applied and Environmental Microbiology. 2002. V. 68. No. 8. P. 3795–3801. doi: 10.1128/AEM.68.8.3795–3801.2002

Микробиологическое состояние дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении органических и минеральных удобрений

© 2020. Н. Е. Завьялова¹, д. б. н., г. н. с.,
И. Г. Широких^{2,3}, д. б. н., зав. лабораторией, в. н. с.,
В. Р. Ямалтдинова¹, к. с-х. н., с. н. с.,

¹Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения академии наук,

614990, Россия, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13 а,

²ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166 а,

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

e-mail: nezavyalova@gmail.com

Изучали влияние различных систем удобрения: органической, минеральной и органоминеральной на агрохимические и микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы длительного (50 лет) стационарного опыта. Контролем служила не получавшая удобрений исходная почва, отвечающая градациям «очень бедной» и «бедной», в соответствии с ориентировочной шкалой обогащённости почв микрофлорой. Показано, что органическая и органоминеральные системы удобрения способствовали увеличению в 2–3 раза количества микроорганизмов основных эколого-трофических групп, тогда как длительное применение минеральной системы удобрений, напротив, сопровождалось сокращением численности микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и азота, по сравнению с вариантом без удобрений. Целлюлозолитическое сообщество в исследуемой почве представлено в основном актиномицетами (55–87%) и немичелиальными бактериями (0–22%). На долю грибов приходится не более 6–27% в зависимости от варианта. Выявлена корреляционная связь между численностью микромицетов и содержанием гумуса ($r = 0,73$), общего ($r = 0,82$) и легкогидролизуемого азота ($r = 0,78$). Наиболее интенсивно процессы минерализации протекают в контрольной почве без удобрений (КАА/МПА = 1,65) и в почве варианта с органо-минеральной системой удобрения (КАА/МПА = 2,23). При этом показатели $C_{орг.}$, значения коэффициентов педотрофности, индексы видового разнообразия, указывают на то, что интенсивность минерализации почвенного органического вещества в этих вариантах не превышает экологически безопасных пределов, и сформировавшиеся микробные сообщества остаются более устойчивыми к негативным антропогенным воздействиям, чем в вариантах с другими изучаемыми системами удобрений.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, системы удобрения, микроорганизмы, эколого-трофические группы, экологические коэффициенты, структура комплексов актиномицетов.

Microbiological status of the Pre-Urals sod-podzolic soil with long-term use of organic and mineral fertilizers

© 2020. N. E. Zavyalova¹ ORCID: 0000-0003-4005-8998[?]

I. G. Shirokikh^{2,3} ORCID: 0000-0002-3319-2729[?]

V. R. Yamaltdinova¹ ORCID: 0000-0003-2945-0585[?]

¹Perm Federal Research Centre Ural Branch of the Academy of Sciences,
13a, Lenina St., Perm, Russia, 614990,

²Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: nezavyalova@gmail.com

In the long-term (50 years) stationary experiment, the effect of organic, mineral and organo-mineral fertilizer systems on agrochemical and microbiological indicators of sod-podzolic soil was studied. The control was natural soil, which corresponds to the “very poor” and “poor” gradations, according to the scale of soil enrichment with microorganisms. It was shown that organic and organo-mineral fertilizer systems contributed to an increase of 2–3 times the number of microorganisms of the main ecological-trophic groups. Prolonged use of mineral fertilizers, on the contrary, reduced the number of microorganisms participating in the carbon and nitrogen cycle, compared with the version without fertilizers. Cellulolytics are represented in the studied soil by actinomycetes (55–87%) and non-mycelial bacteria (0–22%). The share of fungi accounts for no more than 6–27%, depending on the variant. A correlation was found between the number of micromycetes and the content of humus in the soil ($r = 0.73$), total ($r = 0.82$), and easily hydrolyzed nitrogen ($r = 0.78$). The most intensive processes of mineralization occur in the control soil without fertilizers (KAA/MPA = 1.65) and in the soil with an organo-mineral fertilizer system (KAA/MPA = 2.23). The indices C_{org} , the values of the pedotrophic coefficients, the indices of species diversity show that the intensity of mineralization of soil organic matter does not exceed environmentally safe limits. The microbial communities formed in these variants remain more resistant to negative anthropogenic influences than in other variants of experience.

Keywords: sod-podzolic soil, fertilizer systems, microorganisms, ecological-trophic groups, ecological coefficients, structure of actinomycete complexes.

Микробиологическое состояние при изучении динамики плодородия почв представляет собой важное звено, поскольку микроорганизмы осуществляют минерализацию органического вещества и участвуют в процессах его гумификации. Актуальность микробиологических исследований в агроэкосистемах обусловлена отрицательной динамикой содержания гумуса во всех земледельческих регионах Российской Федерации независимо от типа почв [1, 2], но особенно злободневно для дерново-подзолистых почв умеренной зоны [3]. Производство растениеводческой продукции в этой зоне должно сопровождаться обязательным применением комплекса мер по воспроизводству плодородия и улучшению гумусного состояния почв. Это требует разработки и применения эффективных систем удобрения для сохранения и улучшения агрохимических и микробиологических параметров почвы.

Как среда обитания микроорганизмов, естественные дерново-подзолистые почвы характеризуются высокой кислотностью почвенного раствора, низким содержанием водорастворимых органических веществ, недостатком необходимых минеральных элементов. Это исключает возможность развития целого ряда требовательных к среде обитания видов и ограничивает нарастание общей численности микроорганизмов при окультуривании почвы [4, 5].

Применение органических и минеральных удобрений является важным фактором воздействия на почвенное микробное сообщество, определяет его биологическую активность и направленность процессов микробной трансформации почвенного органического вещества [6–8]. Большой интерес в этом плане представляют результаты многолетних исследова-

ований в длительных стационарных опытах, когда выявляемые эффекты аккумулируются во времени на фоне изменения факторов окружающей среды в конкретной почвенно-климатической зоне [9, 10].

Цель работы – оценка влияния длительного применения органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения на микробиологическое состояние и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы Предуралья в длительном стационарном опыте.

Объекты и методы

Исследования проводили в стационарном полевом опыте, заложенном в 1968 г. на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве опытного поля Пермского НИИСХ Пермского Федерального исследовательского центра УрО РАН. В качестве минеральных удобрений (НРК) использовали аммиачную селитру или мочевины, простой суперфосфат и хлористый калий. Схема опыта: контроль (без удобрений); навоз – 10 т/га; навоз – 20 т/га; НРК в дозе, эквивалентной 10 т/га навоза; НРК в дозе, эквивалентной 20 т/га навоза; 5 т/га навоза + НРК – эквивалент 5 т/га навоза; 10 т/га навоза + НРК – эквивалент 10 т/га навоза; 20 т/га навоза + НРК – эквивалент 20 т/га навоза в год.

Размещение вариантов рендомизированное. Делянки расположены в четыре яруса. Размер посевной делянки 115,5 м², учётной – 80 м². Чередование культур в севообороте: пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, ячмень, картофель, овёс.

Образцы почвы отбирали на глубину корнеобитаемого слоя (0–20 см) по окончании

шести ротаций восьмипольного севооборота, на двух не смежных повторениях после уборки последней культуры севооборота – овса (*Avena sativa* L.) сорта Стайер.

Для оценки направленности и интенсивности процессов трансформации органического вещества в образцах почв проводили определение комплекса наиболее информативных показателей состояния почвы в соответствии с общепринятыми методами [11]: органический углерод – методом мокрого озоления, общий азот – по Къельдалю, легкогидролизуемый азот – по Шконде и Королевой, нитратный – потенциметрически, аммиачный – фотометрически по методу ЦИНАО.

Для характеристики почвенных микробценозов определяли численность экологотрофических групп микроорганизмов методом посева на стандартные питательные среды. Усваивающие органические формы азота (аммонифицирующие) микроорганизмы учитывали на мясо-пептонном агаре (МПА), усваивающие минеральные источники азота – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), целлюлозолитики – на агаре Гетчинсона с фильтровальной бумагой, олиготрофные – на почвенном агаре (ПА), актиномицеты – на казеин-глицериновом агаре (КГА), микроскопические грибы – на агаре Чапека (ЧА) [12]. Для характеристики изменений в струк-

туре почвенного микробного сообщества рассчитывали коэффициенты минерализации (КАА/МПА) и педотрофности (ПА/МПА) [13]. В качестве модельной группы микроорганизмов для выявления структурных перестроек микробного сообщества использовали актиномицеты. Определение видовой структуры комплексов актиномицетов проводили при выделении на КГА, с учётом частоты встречаемости и обилия видов. Дифференцировали и учитывали количественно все цветочные группы актиномицетов (секции и серии) [14]. Морфологию клеток изучали на живых препаратах при микроскопировании – объективы 20 и 40, окуляр 10, микроскоп Leica DM 2500 (Германия). Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием встроенного пакета программ EXCEL.

Результаты и обсуждение

Содержание органического углерода ($C_{орг.}$) и общего азота ($N_{общ.}$) в почве являются основными показателями, определяющими уровень её плодородия. В зависимости от применяемой системы удобрения: органической, минеральной или органоминеральной – содержание этих элементов в дерново-подзолистой почве повышалось в различной степени. Наиболее

Таблица 1 / Table 1
Агрохимические показатели почвы в зависимости от системы удобрения
Agrochemical parameters of soil depending on the fertilizer system

Система удобрений Fertilizer system	Вариант Variant	$C_{орг.}$ $C_{org}, \%$	pH_{KCl}	P_2O_5	K_2O	$N_{общ.}$ $N_{tot.}$	$N_{лг.}$ $N_{lg.}$	$N_{мин.}$ N_{min}
	Без удобрений (контроль) Without fertilizers (control)	1,14	4,9	125	174	1219,8	160,3	8,3
Органическая Organic	Навоз – 10 т/га Manure – 10 ton/ha	1,30	5,3	180	212	1371,0	195,7	8,5
	Навоз – 20 т/га Manure – 20 ton/ha	1,45	5,6	245	286	1420,0	212,8	10,6
Минеральная Mineral	НПК – эквивалент 10 т/га навоза equivalent to 10 ton/ha of manure	1,26	4,6	235	203	1252,0	189,2	9,6
	НПК – эквивалент 20 т/га навоза equivalent to 20 ton/ha of manure	1,29	4,6	261	279	1422,0	217,2	10,1
Органоминеральная Organo-mineral	5 т/га навоза + НПК эквивалент 5 ton/ha manure + NPK equivalent	1,33	4,9	240	250	1279,8	210,0	9,4
	10 т/га навоза + НПК эквивалент 10 ton/ha manure + NPK equivalent	1,43	4,9	270	337	1579,8	225,1	9,6
	20 т/га навоза + НПК эквивалент 20 ton/ha manure + NPK equivalent	1,57	4,9	404	455	1652,5	256,6	12,3
	HCP_{05}/LSD_{05}	0,08	0,3	81	42	170,0	38,3	1,2

значительный рост запасов углерода в почве обеспечили варианты с насыщением пашни навозом – 20 т/га (с 1,14 в контроле до 1,45%), и при сочетании 10–20 т/га навоза с NPK в эквивалентных навозу дозах (до 1,33–1,57%) (табл. 1).

Положительную роль в сохранении и накоплении органического углерода и $N_{\text{общ}}$ в почве сыграло наличие в севообороте двух полей клевера [15]. Длительное применение органического удобрения способствовало снижению кислотности почвы на 0,4–0,7 ед. рН, тогда как использование минеральных удобрений, напротив, привело к повышению почвенной кислотности на 0,3 ед. рН по сравнению с контролем. Все применяемые системы удобрений обеспечили увеличение в пахотном слое почвы по сравнению с вариантом без удобрения содержания подвижных форм фосфора и калия. Наибольшее накопление этих элементов (P_2O_5 до 270 и 404 мг/кг; K_2O до 337 и 455 мг/кг) наблюдали при внесении соответственно 10 и 20 т/га навоза в год совместно с минеральными удобрениями (NPK) в эквивалентных навозу количествах (органоминеральная система удобрений).

Длительное применение различных систем удобрения оказало положительное влияние на азотный режим исследуемой почвы. Органические системы удобрений повысили содержание $N_{\text{общ}}$ на 12,4–16,4%, минеральные – на 2,6–16,6%, органоминеральные – на 29,5–35,5%.

Минеральные формы азота ($N_{\text{мин}}$) представлены в почве незначительно, их доля составляет около 1,0% от общего азота. Содержание $N_{\text{мин}}$ достоверно увеличилось по сравнению с контролем при внесении высоких доз удобрений, то есть в вариантах с насыщением почвы навозом – 20 т/га, минеральным эквивалентом данной дозы навоза и при совместном применении 10 и 20 т/га навоза и NPK в эквивалентных навозу количествах. Ближайшим резервом питания растений является фракция легкогидролизуемого азота ($N_{\text{лг}}$). Отмечено достоверное увеличение в почве содержания $N_{\text{лг}}$ в результате длительного применения изучаемых систем удобрения, что свидетельствует об улучшении азотного режима почвы. Максимальный уровень $N_{\text{лг}}$ (256,6 мг/кг почвы) отмечен в варианте с внесением 20 т/га навоза в год совместно с эквивалентным количеством минеральных удобрений.

Определение численности микроорганизмов методом посева из разведений на твёр-

дые питательные среды показало, что изучаемая почва в соответствии с ориентировочной шкалой обогащённости почвы микрофлорой [13], соответствует грациям «очень бедной» и «бедной». Длительное применение различных систем удобрения в стационарном опыте на дерново-подзолистой почве оказало существенное влияние на количественный и качественный состав почвенных микроорганизмов (рис.). На фоне использования минеральных удобрений наблюдали снижение численности аммонифицирующих, олиготрофных и усваивающих минеральные формы азота бактерий по сравнению с контролем, особенно значительное при увеличении эквивалентной дозы NPK с 10 до 20 т/га. Численность целлюлозолитиков при внесении минеральных удобрений в низкой дозе увеличивалась, а при высокой – уменьшалась по сравнению с контролем. Очевидно, снижение микробной численности в этих вариантах связано с отмеченным выше подкислением почвенного раствора в результате длительного применения минеральных удобрений.

Органическая и органоминеральная системы удобрения, напротив, способствовали увеличению в 2–3 раза количества микроорганизмов основных эколого-трофических групп по сравнению с вариантом без удобрений.

Внесение невысокой дозы навоза (5 т/га) в сочетании с NPK в эквивалентном навозу количестве не способствовало накоплению в почве микроорганизмов, участвующих в круговороте азота и углерода. Их содержание оставалось на уровне контроля. Наиболее благоприятные условия для роста и размножения всех учитываемых групп микроорганизмов были установлены при насыщении пашни навозом из расчёта 10 т/га в год, и при органоминеральной системе удобрения в варианте 20 т/га навоза + эквивалент NPK. Количество бактерий на МПА в этих вариантах достигало максимальных в опыте значений – 3675 ± 536 и 4050 ± 996 тыс. КОЕ/г в. с. почвы.

Наибольшему накоплению микроорганизмов, потребляющих минеральные формы азота (бактерии, грибы, актиномицеты, вырастающие на КАА) способствовали органическая система удобрения с насыщением почвы 10 т/га навоза ежегодно и органоминеральные системы удобрений. На фоне длительного применения минеральных удобрений содержание данной группы микроорганизмов, напротив, значительно ниже, чем в контроле. В долевого отношении в составе иммобилизирующей минеральный азот микрофлоры преобладали бактерии, составляя от 79 до 94%, при этом

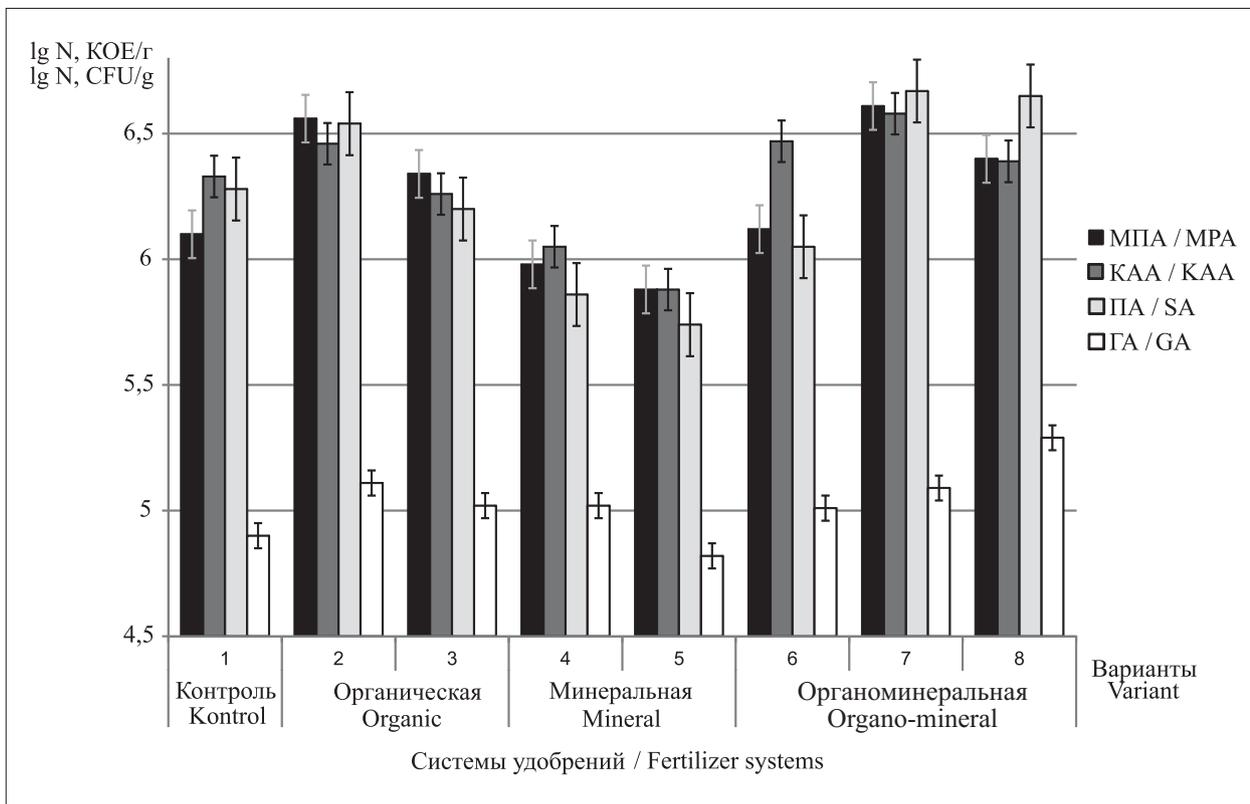


Рис. Количество микроорганизмов (N, КОЕ/г) разных эколого-трофических групп в зависимости от применяемой системы удобрения: 1 – без удобрений; 2 – навоз 10 т/га; 3 – навоз 20 т/га; 4 – NPK в дозе, эквивалентной 10 т/га навоза; 5 – NPK в дозе, эквивалентной 20 т/га навоза; 6 – 5 т/га навоза + NPK – эквивалент 5 т/га навоза; 7 – 10 т/га навоза + NPK – эквивалент 10 т/га навоза; 8 – 20 т/га навоза + NPK – эквивалент 20 т/га навоза

Fig. Number of microorganisms (N, CFU/g) of different ecological and trophic groups depending on the applied fertilizer system: 1 – without fertilizers; 2 – manure 10 ton/ha; 3 – manure 20 ton/ha; 4 – NPK in a dose equivalent to 10 ton/ha of manure; 5 – NPK in a dose equivalent to 20 ton/ha of manure; 6 – 5 ton/ha of manure + NPK – equivalent to 5 ton/ha of manure; 7 – 10 ton/ha of manure + NPK – equivalent to 10 ton/ha of manure; 8 – 20 ton/ha of manure + NPK – equivalent to 20 ton/ha of manure

доля мицелиальных бактерий – актиномицетов изменялась по вариантам от 4,5 до 18%. Доля грибов в составе утилизирующей минеральные формы азота микрофлоры была самой малочисленной и не превышала 0–4,5%.

Численность целлюлолитической микрофлоры, разлагающей безазотистое органическое вещество почвы (полисахариды, целлюлозы) варьировала от 66 ± 12 тыс. до $195 \pm 17,9$ тыс. КОЕ/г в с. почвы в зависимости от варианта (рис.). Наибольшему увеличению количества микроорганизмов-целлюлолитиков способствовала органоминеральная система удобрения с насыщением почвы навозом 20 т/га и эквивалентным количеством NPK. Наименьшая численность целлюлолитиков отмечена при внесении минеральных удобрений в дозе, эквивалентной 20 т/га навоза. В доле отношении наибольшую часть целлюлолитического сообщества составляют актиномицеты – 55–87%, доля грибов колеблется от

6 до 27%, немцелиальных бактерий – 0–22%. Корреляционный анализ выявил тесную положительную связь между общим количеством целлюлолитиков и содержанием гумуса ($r = 0,78$), а также содержанием в почве общего азота ($r = 0,70$).

Помимо определения общей численности эколого-трофических групп микроорганизмов, дополнительную информацию в агроэкологических исследованиях почвенной микробиоты даёт расчёт экологических коэффициентов, которые позволяют проследить за особенностями взаимоотношений отдельных групп микроорганизмов, участвующих в общем процессе трансформации органического вещества почвы [13].

Степень развития амилотической части почвенного микробоценоза и, соответственно, её активность в трансформации углеводов почвы и связывании свободного азота отражает коэффициент минерализации и иммобилизации

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты, характеризующие направленность микробиологических процессов, и численность мицелиальных групп микроорганизмов в зависимости от системы удобрения
Coefficients characterizing the direction of microbiological processes and the number of mycelial groups of microorganisms depending on the fertilizer system

Вариант Variant	Коэффициенты Coefficients		Численность, тыс. КОЕ/г Number, thousand CFU/g		Доля актиномицетов в прокариотном комплексе, % Share of actinomycetes in prokariotic complex, %
	минерализации mineralizations (КАА/МПА)	педотрофности pedotrophic (ПА/МПА)	микромиицетов micromycetes	актиномицетов actinomycetes	
Без удобрений (контроль) Without fertilizers (control)	1,65	1,50	23±19,7	767±501	17,8
Навоз – 10 т/га Manure – 10 ton/ha	0,76	0,95	38±18,3	1050±671	17,2
Навоз – 20 т/га Manure – 20 ton/ha	0,80	0,72	25±16,4	783±337	10,9
НРК – эквивалент 10 т/га навоза equivalent to 10 ton/ha of manure	1,14	0,75	25±5,5	1317±1163	18,0
НРК – эквивалент 20 т/га навоза equivalent to 20 ton/ha of manure	1,00	0,73	33±10,3	917±793	19,2
5 т/га навоза + НРК эквивалент 5 ton/ha manure + NPK equivalent	2,23	0,86	25±22,6	1450±1106	17,2
10 т/га навоза + НРК эквивалент 10 ton/ha manure + NPK equivalent	0,93	1,17	40±12,6	600±276	13,8
20 т/га навоза + НРК эквивалент 20 ton/ha manure + NPK equivalent	0,96	1,77	83±40,8	950±547	21,1

Е.Н. Мишустина (соотношение КАА/МПА). Чем он выше (выше 1), тем минерализационные процессы протекают в почве интенсивнее, но слишком высокое значение коэффициента минерализации может косвенно свидетельствовать о повышении скорости разложения гумуса. Судя по величине коэффициента, процессы минерализации протекали наиболее интенсивно в вариантах без удобрений (1,65) и при насыщении почвы навозом 5 т/га + эквивалент НРК (2,23) (табл. 2).

При длительном внесении органических удобрений коэффициенты минерализации характеризовались минимальными в опыте значениями – 0,76–0,80, а применение органо-минеральной системы удобрения с умеренным (10 т/га) и повышенным (20 т/га) ежегодным внесением навоза обеспечило коэффициенты минерализации, близкие к единице (0,93–0,96). Близкими к единице значениями (1,00–1,14) характеризовались коэффициенты минерализации и в почве вариантов с минеральной системой удобрения.

Степень развития микроорганизмов, относящихся к коренному микронаселению почвы (автохтонная часть), а также участвующих в новообразовании гумусовых соединений характеризует отношение числа микроорганизмов, растущих на почвенном агаре (ПА), к числу микроорганизмов, растущих на богатых органических средах (МПА) – коэффициент педотрофности по Никитину [13]. Считается, что чем выше данный коэффициент, тем более агроэкосистема приближена к естественным ценозам изучаемой почвенно-климатической зоны и обладает большей устойчивостью к негативным воздействиям со стороны различных антропогенных вмешательств. Повышение данного индекса в целом может свидетельствовать о замедлении процессов деструкции органического вещества и о переходе изучаемого биоценоза в более устойчивое состояние. По результатам наших исследований вариант без применения удобрений и органо-минеральные системы, где наряду с навозом (10 и 20 т/га) вносили НРК в эквивалентных

навозу количествах, способствовали формированию микробоценозов, более устойчивых к негативным антропогенным воздействиям, чем в других вариантах опыта. Таким образом, расчёт экологических коэффициентов выявил различную направленность микробиологических процессов, протекающих в исследуемой дерново-подзолистой почве в зависимости от доз и вида длительно вносимых удобрений и формирования различных пищевых режимов.

Основными деструкторами растительных остатков в почве являются микромицеты (микроскопические грибы). Численность микромицетов при определении методом посева, как правило, очень низкая по сравнению с другими группами микроорганизмов. Это объясняется тем, что грибы обычно представлены в почвах стерильным мицелием, споры встречаются единично [5], поэтому результаты посева не отражают реальной картины, но пригодны для сравнительных оценок. Количество грибных пропагул в почве длительного стационара изменялось от $23,0 \pm 19,7$ тыс. в варианте без удобрений до $83,0 \pm 40,8$ тыс. КОЕ/г в варианте с насыщением почвы навозом в количестве 20 т/га и эквивалентным количеством NPK (табл. 2). Численность микромицетов

тесно коррелировала с содержанием гумуса ($r = 0,73$), общего ($r = 0,82$) и легкогидролизуемого азота ($r = 0,78$).

Наряду с грибами, в разложении растительных остатков активно участвуют мицелиальные бактерии – актиномицеты, вступая в сложный конвейерный процесс на поздних стадиях, утилизируя недоступные другим бактериям трудноразлагаемые компоненты. Доля актиномицетов в прокариотном комплексе дерново-подзолистой почвы изменялась в пределах 10,9–21,2% в зависимости от варианта (табл. 2). Актиномицеты, как и многие микроскопические грибы, образуют тёмноокрашенные пигменты – меланины, являющиеся предшественниками гумусовых веществ в почве, принимают участие в формировании почвенного плодородия [16]. Наибольшее накопление в почве актиномицетов наблюдали в вариантах с умеренными дозами минеральных и органических удобрений (навоз – 10 т/га в год, NPK – эквивалент 10 т/га навоза, навоз – 5 т/га в год + NPK – эквивалент 5 т/га навоза). При дальнейшем повышении доз удобрений количество актиномицетов в почве не только не увеличивалось, но, напротив, сопровождалось тенденцией к снижению. Наряду с количественны-

Таблица 3 / Table 3
Видовая структура комплексов актиномицетов в зависимости от системы удобрения
Species structure of actinomycetes complexes depending on the fertilizer system

Вариант Variant	Частота встречаемости/ доленое участие видов Frequency / abundance of species							
	секций и серий рода <i>Streptomyces</i> sections and series of the genus <i>Streptomyces</i>							рода genera <i>Micromonospora</i>
	Cinereus				Albus	Helvolutus	Imperfectus	
	Achromogenera	Chromogenera	Aureus	Violaceus				
Без удобрений (контроль) Without fertilizers (control)	66/15,2	66/13,0	50/6,4	0	50/6,5	50/6,3	66/39,6	66/13,0
Навоз – 10 т/га Manure – 10 ton/ha	50/6,3	50/9,5	50/6,3	0	50/11,0	0	66/27,0	100/39,9
Навоз – 20 т/га Manure – 20 ton/ha	50/10,6	33/4,2	83/19,1	0	33/4,3	0	100/48,9	66/12,8
NPK – эквивалент 10 т/га навоза equivalent to 10 ton/ha of manure	66/34,2	50/8,9	83/8,9	17/1,3	50/3,8	17/1,2	83/26,6	66/15,2
NPK – эквивалент 20 т/га навоза equivalent to 20 ton/ha of manure	50/21,8	66/16,5	50/9,0	33/5,5	33/5,5	33/9,0	83/32,7	0
5 т/га навоза + NPK эквивалент 5 ton/ha manure + NPK equivalent	83/34,4	33/6,9	50/5,7	33/2,4	50/10,3	66/4,7	100/29,9	50/5,7
10 т/га навоза + NPK эквивалент 10 ton/ha manure + NPK equivalent	100/30,6	17/2,8	50/8,3	33/5,6	17/2,7	33/5,5	33/16,7	50/27,8
20 т/га навоза + NPK эквивалент 20 ton/ha manure + NPK equivalent	83/33,3	17/5,3	66/8,8	17/3,5	66/7,0	0	66/31,6	50/10,5

ми, выявлены качественные различия в видовой структуре актиномицетов, заключающиеся в различной частоте встречаемости и относительном обилии представителей отдельных цветковых секций и серий рода *Streptomyces* в зависимости от варианта (табл. 3).

Актиномицетный комплекс в почве варианта без удобрений включал виды шести цветковых секций и серий рода *Streptomyces*, а также виды рода *Micromonospora*. Доминировали по частоте встречаемости (> 50%) и доле участия (> 13%) в комплексе представители серий *Cinereus Achromogenes*, *Cinereus Chromogenes*, *Imperfectus* и микромонопоровые актиномицеты. В результате насыщения пашни 10 и 20 т/га навозом ежегодно количество видовых секций и серий уменьшилось до пяти за счёт выпадения видов секции *Helvolus*. В вариантах с внесением в почву НРК в дозах, эквивалентных 10 и 20 т/га навоза, видовой спектр, напротив, увеличивался за счёт представителей серии *Cinereus Violaceus*, а виды серии *Cinereus Aureus* перешли в разряд доминантов. Вместе с тем, повышенная доза минеральных удобрений способствовала вытеснению из комплекса представителей рода *Micromonospora*. При насыщении пашни навозом в дозах 5 и 10 т/га + эквивалент НРК в актиномицетном комплексе наблюдали наибольшее разнообразие видов. Увеличение дозы навоза до 20 т/га + эквивалент НРК оказало на комплекс актиномицетов обратное действие: видовой спектр сократился за счёт выпадения видов секции *Helvolus*, а представители серии *Cinereus Chromogenes*, как и в варианте «навоз 10 т/га + эквивалент НРК» выбыли из числа доминирующих.

Заключение

Под влиянием различных систем удобрения: органической, минеральной и органоминеральной в пахотном слое дерново-подзолистой почвы длительного (50 лет) стационарного опыта в различной степени увеличились запасы общего углерода и азота, повысилось содержание подвижных форм фосфора и калия, изменилась степень почвенной кислотности. В условиях различных пищевых режимов в почве сформировались сообщества, различающиеся по численности и соотношению представителей основных эколого-трофических групп микроорганизмов, видовому составу актиномицетов. Органическая и органоминеральная системы удобрения способствовали увеличению

в 2–3 раза численности микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и азота, тогда как длительное применение минеральной системы удобрения, напротив, сопровождалось сокращением их численности, по сравнению с вариантом без удобрений. В зависимости от уровня обеспеченности почвы углеродом и азотом в пахотном слое протекали разнонаправленные процессы трансформации их соединений, о чём свидетельствуют различные по величине значения экологических коэффициентов. Установлена тесная положительная связь между количеством микроорганизмов-деструкторов целлюлозы и содержанием в почве гумуса ($r = 0,78$), а также общего азота ($r = 0,70$). Выявлена тесная корреляция между численностью микроскопических грибов и содержанием в почве гумуса ($r = 0,73$), общего ($r = 0,82$) и легкогидролизуемого азота ($r = 0,78$), что подтверждает ведущую роль почвенной микробиоты в трансформации органического вещества почвы при использовании различных систем удобрения.

Наиболее благоприятные эдафические условия в дерново-подзолистой почве Предуралья, судя по данным микробиологического и агрохимического обследования, сложились при длительном применении органической и органоминеральной систем удобрений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-590166 р-а «Теоретические и прикладные аспекты трансформации органического вещества и азота пахотных дерново-подзолистых почв Предуралья».

Литература

1. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
2. Тихонович И.А., Круглов Ю.В. Микробиологические аспекты плодородия почвы и проблемы устойчивого земледелия // Плодородие. 2006. № 5. С. 9–12.
3. Гомонова Н.Ф., Минеев В.Г. Динамика гумусного состояния и азотного режима дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2012. № 6. С. 23–31.
4. Мишустин Е.Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия. М.: Наука, 1972. 343 с.
5. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
6. Минеев В.Г., Козлова Ю.Е., Кураков А.В., Гомонова Н.Ф., Звягинцев Д.Г. Влияние последствия минеральных удобрений на микробиологические и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // Доклады РАСХН. 2001. № 4. С. 19–21.

7. Мосина Л.В., Мерзлая Г.Е. Экологическая оценка влияния органических и минеральных удобрений на микрофлору дерново-подзолистой почвы и продуктивность агроценозов в экстремальных погодных условиях // Известия ТСХА. 2013. № 5. С. 5–18.

8. Kurakov A.V., Kozlova Yu.E. Tolerance of the microbial complex of soddy-podzolic soils to the impact of mineral fertilizers // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. No. 5. P. 528–532.

9. Cruz A.F., Hamel C., Hanson K., Selles F., Zentner R.P. Thirty-seven years of soil nitrogen and phosphorus fertility management shapes the structure and function of the soil microbial community in a Brown Chernozem // Plant Soil. 2009. V. 315. P. 173–184.

10. Sun D., Bi Q., Li K., Dai P., Yu Y., Zhou W., Jin C. Significance of temperature and water availability for soil phosphorus transformation and microbial community composition as affected by fertilizer sources // Biology and fertility of soils. 2018. V. 54. No. 2. P. 229–241.

11. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

12. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 603 с.

13. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: научно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородская сельскохозяйственная академия, 2012. 64 с.

14. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.

15. Завьялова Н.Е., Фомин Д.С., Тетерлев И.С. Влияние севооборотов и бессменных посевов на агрохимические свойства и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2019. № 1. С. 5–10.

16. Звягинцев Д.Г. Строение и функционирование комплекса почвенных микроорганизмов // Структурно-функциональная роль почвы и почвенной биоты в биосфере. М.: Наука, 2003. С. 102–114.

References

1. Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moskva: GEOS, 2015. 233 p. (in Russian).

2. Tikhonovich I.A., Kruglov Yu.V. Microbiological aspects of soil fertility and problems of sustainable agriculture // Plodorodiye. 2006. No. 5. P. 9–12 (in Russian).

3. Gomonova N.F., Mineyev V.G. Dynamics of the humus state and the nitrogen regime of the sod-podzolic medium loamy soil with prolonged use of fertilizers // Agrokimiya. 2012. No. 6. P. 23–31 (in Russian).

4. Mishustin Ye.N. Microorganisms and productivity of farming. Moskva: Nauka, 1972. 343 p. (in Russian).

5. Aristovskaya T.V. Microbiology of soil formation processes. Leningrad: Nauka, 1980. 187 p. (in Russian).

6. Mineev V.G., Kozlova Yu.E., Kurakov A.V., Gomonova N.F., Zvyagintsev D.G. Result of the effect of mineral fertilizers on the microbiological and agrochemical properties of sod-podzolic soil // Doklady RASKHN. 2001. No. 4. P. 19–21 (in Russian).

7. Mosina L.V., Merzlaya G.E. Ecological assessment of the effect of organic and mineral fertilizers on the microflora of sod-podzolic soil and the productivity of agroценоses in extreme weather conditions // Izvestiya TSKHA. 2013. V. 5. P. 5–18 (in Russian).

8. Kurakov A.V., Kozlova Yu.E. Tolerance of the microbial complex of soddy-podzolic soils to the impact of mineral fertilizers // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. No. 5. P. 528–532.

9. Cruz A.F., Hamel C., Hanson K., Selles F., Zentner R.P. Thirty-seven years of soil nitrogen and phosphorus fertility management shapes the structure and function of the soil microbial community in a Brown Chernozem // Plant Soil. 2009. V. 315. P. 173–184. doi: 10.1007/s11104-008-9742-x

10. Sun D., Bi Q., Li K., Dai P., Yu Y., Zhou W., Jin C. Significance of temperature and water availability for soil phosphorus transformation and microbial community composition as affected by fertilizer sources // Biology and fertility of soils. 2018. V. 54. No. 2. P. 229–241. doi: 10.1007/s00374-017-1252-7

11. Workshop on agrochemistry / Ed. V.G. Mineev. Moskva: Izd-vo MGU, 2001. 689 p. (in Russian).

12. Workshop in microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 603 p. (in Russian).

13. Titova V.I., Kozlov A.V. Methods for assessing the functioning of soil microbiocenosis involved in the transformation of organic matter: a scientific and methodological guide. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2012. 64 p. (in Russian).

14. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Manual of actinomycetes. Genus *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).

15. Zav'yalova N.E., Fomin D.S., Teterlev I.S. The influence of crop rotations and permanent crops on the agrochemical properties and the nitrogen regime of the sod-podzolic soil of the Pre-Urals // Agrokimiya. 2019. No. 1. P. 5–10 (in Russian).

16. Zvyagintsev D.G. Structure and functioning of a complex of soil microorganisms // Structural and functional role of soil and soil biota in the biosphere. Moskva: Nauka, 2003. P. 102–114 (in Russian).

Перспективы использования хвостов обогащения фосфоритов в качестве удобрений для органического земледелия

© 2020. Н. В. Сырчина^{1,2}, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
Н. Н. Богатырёва¹, аспирант, Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,

¹Вятский государственный университет,

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

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Органическое земледелие и производство органических продуктов ориентировано на использование натуральных экологически безопасных удобрений и средств защиты растений, позволяющих получить экологически чистую продукцию и предотвратить загрязнение окружающей среды. К числу таких удобрений можно отнести хвосты обогащения (эфеля) Верхнекамского фосфоритного рудника. Основными агрохимически ценными компонентами эфелей являются фосфориты мелких фракций, глауконит и известковые материалы. Для выполнения исследований на территории хвостохранилища было отобрано 28 образцов эфеля. В результате исследований установлено, что среднее содержание (%) P_2O_5 в образцах составляет $7,9 \pm 1,7$; $K_2O - 3,1 \pm 0,7$; железа (в пересчёте на Fe_2O_3) – $11,2 \pm 2,5$. Содержание Cd не превышает 0,2 мг/кг. Методом магнитной сепарации эфеля были разделены на магнитную и немагнитную фракции. Установлено, что доля магнитной фракции в разных образцах варьирует в широких пределах и в среднем составляет 68%. Основным компонентом магнитной фракции является глауконит. В состав немагнитной фракции преимущественно входят фосфатные материалы, карбонаты, кварц. Сrostки разных минералов попадают в обе фракции. Распределение элементов по отдельным фракциям неравномерно. В магнитной фракции концентрируются U, Th, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb. Содержание токсичных и радиоактивных элементов в эфеле умеренное или низкое и не представляет опасности для окружающей среды. Относительно высокое содержание таких микроэлементов, как Se, Zn, Co, увеличивает агрохимическую ценность эфелей. Химический состав хвостов обогащения фосфоритных руд Верхнекамского фосфоритного рудника позволяет позиционировать их как перспективное сырьё для переработки в натуральные фосфорно-калийные удобрения с микроэлементами для органического земледелия.

Ключевые слова: удобрения, органическое земледелие, натуральные фосфорные удобрения, фосфориты, глаукониты, Вятско-Камское месторождение, химический состав фосфоритов.

Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming

© 2020 N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760, T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047,
N. N. Bogatyryova¹ ORCID: 0000-0002-6028-6632, G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of Komi Science Center of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktvykar, Komi Republic, Russia, 167982,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Organic farming and the production of organic products is focused on the use of natural environmentally friendly fertilizers and plant protection products, which allows obtaining high quality and safe products and prevent environmental pollution. Such fertilizers include the fine-grained tailings (ephels) of the Verkhnekamsk phosphorite mine. The main agrochemically valuable components of ephels are phosphorites of small fractions, glauconite and calcareous materials. To carry out research on the territory of the tailing dump, 28 samples of ephel were selected. As a result of studies, it was found that the average content (%) of P_2O_5 in the samples is 7.9 ± 1.7 ; $K_2O - 3.1 \pm 0.7$; iron (in terms of Fe_2O_3) – 11.2 ± 2.5 . The content of Cd does not exceed 0.2 mg/kg. By the method of magnetic separation, ephels were divided into magnetic and non-magnetic fractions. It was found that the share of the magnetic fraction in different samples varies widely and averages 68%. The main component of the magnetic fraction is glauconite. The non-magnetic fraction mainly includes

phosphate materials, carbonates, quartz. Splices of different minerals fall into both fractions. The distribution of elements in individual fractions is uneven. Iron, potassium and elements such as Y, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cs, Se are concentrated in the magnetic fraction but U, Th, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb are concentrated in the non-magnetic fraction. The content of toxic and radioactive elements in the ephel is moderate or low and does not pose a threat to the environment. The relatively high content of trace elements such as Se, Zn, Co, increases the agrochemical value of ephels. The chemical composition of the tailings of phosphate ore processing at the Verkhnekamsk phosphate mine allows them to be positioned as a promising raw material for processing into natural phosphorus-potassium fertilizers with trace elements for organic farming.

Keywords: fertilizers, organic farming, natural phosphorus fertilizers, phosphorites, glauconites, Vyatka-Kama deposit of phosphorites, chemical composition of phosphorites.

Важнейшим фактором устойчивого развития сельского хозяйства в современных условиях является ориентация на экологически чистые производственные системы. К таким системам относится органическое земледелие (ОЗ) [1, 2]. Внедрение ОЗ имеет не только экологические, но и экономические аспекты. По имеющимся оценкам, ускоренное развитие органического производства позволит значительно расширить экспортный потенциал России [3]. С 1 января 2020 г. в РФ вступает в силу Федеральный закон № 280-ФЗ от 03.08.2018 «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Данный закон существенно ограничивает перечень агрохимикатов, которые могут быть использованы при производстве органических продуктов. В соответствии с ГОСТ 33980-2016, в качестве фосфорных удобрений в ОЗ разрешено применение только природных фосфатов, алюминиево-кальциевого фосфата и томас-шлака. При этом содержание кадмия (Cd) в удобрениях не должно превышать 90 мг/кг P_2O_5 . Традиционные фосфорные удобрения, получаемые методом химической переработки фосфатного сырья, в список удобрений для ОЗ не входят. Из всех разрешённых в ОЗ фосфорных удобрений наибольшее практическое значение имеют фосфориты, характеризующиеся низким содержанием Cd. Особое внимание к содержанию Cd обусловлено высокой токсичностью соответствующего элемента. Международное агентство по исследованию рака (МАИР) относит Cd к канцерогенам 1 класса [4]. Повышенное поступление Cd в организм приводит к поражению мочеполовой и опорно-двигательной систем, нарушению репродуктивных функций и другим серьёзным заболеваниям [5]. В 2016 г. Еврокомиссия (European Commission) предложила ввести ограничения на содержание Cd в фосфорных удобрениях до 60 мг/кг с последующим снижением этого показателя до 40 мг/кг (через три года) и до 20 мг/кг (через 12 лет) [6]. Наиболее высокое содержание Cd (до

500 мг/кг и более) характерно для фосфоритов, добываемых на территории США, Марокко, Перу, Того, Туниса, Сенегала [7]. Российские фосфориты характеризуются низким содержанием Cd, что допускает их применение в ОЗ и расширяет экспортный потенциал.

Агрохимическая ценность фосфоритов определяется не только наличием в их составе соединений фосфора (P_2O_5), но и сопутствующими компонентами (карбонаты, глауконит, микроэлементы), однако, до настоящего времени качество фосфатного сырья в основном рассматривалось с точки зрения перспектив его химической переработки. Производство органических продуктов требует иного подхода, ориентированного на сохранение окружающей среды от загрязнения, деградации и истощения.

Большой интерес для ОЗ в качестве натуральных фосфорных удобрений могут представлять фосфориты крупнейшего в РФ Вятско-Камского месторождения. В настоящее время добыча руды на месторождении не производится, однако в период активного освоения месторождения на территории Верхнекамского фосфоритного рудника были накоплены миллионы тонн хвостов обогащения (эфелей), основными компонентами которых являются фосфориты мелких фракций и кварцево-глауконитовые пески.

Цель настоящей работы состояла в оценке возможности и перспектив применения эфелей Верхнекамского фосфоритного рудника в качестве удобрения для органического земледелия.

Объекты и методы

Объектом исследования явились хвосты обогащения фосфоритовых руд Вятско-Камского месторождения. Соответствующие руды преимущественно представлены желваковыми фосфоритами, сгруженными в кварцево-глауконитовых песках [8]. Содержание P_2O_5 в желваках обычно варьирует в пределах 12–33%. Единственным пред-

приятием, занимающимся добычей, обогащением и переработкой фосфоритов на месторождении, был Верхнекамский фосфоритовый рудник (пос. Рудничный Верхнекамского района Кировской области). Добыча и переработка руды осуществлялась в течение 70 лет. Руда при обогащении разделялась на концентрат, используемый для производства фосфоритной муки, и хвосты обогащения, которые складировались на территории хвостохранилища. Хвостохранилище, действующее в посёлке Рудничном до 1980 г, к настоящему времени рекультивировано и застроено. С 1980 по 2002 гг. эфеля сбрасывались в новое (действующее) хвостохранилище [9]. Объём хвостов, накопленных за этот период, превысил 20 млн т. Основными компонентами эфелей являются глауконит, фосфориты мелких фракций, кварцевый песок, известковые

и глинистые материалы [10]. Непосредственный интерес для практического применения в агрохимии представляют фосфориты, глаукониты и известковые компоненты. Кварцевый песок и глины не имеют агрохимической ценности. К вредным примесям относятся соединения железа, токсичные элементы и естественные радионуклиды.

Отбор образцов эфеля для проведения исследований осуществлялся на территории действующего хвостохранилища. Всего было отобрано и проанализировано 28 образцов. Пробы отбирались с глубины от 0 до 10 метров. Исследования проводились в лабораторных условиях. Растительные остатки из отобранных образцов удалялись. Подготовка проб и их анализ выполнялись в соответствии с методами, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Методы исследования эфелей / Methods of researching tails of enrichment of phosphorites

Показатель Indicator	Метод исследования Research method	Принцип метода Principle of method
Влажность (в том числе гигроскопическая), % Humidity (including hygroscopic), %	ГОСТ 5180-2015	Высушивание подготовленной пробы массой 20 г до постоянной массы при температуре 105±2 °С
Насыпная плотность, г/см ³ Bulk density, g/cm ³	ГОСТ 32721-2014	Взвешивание подготовленной пробы эфеля в мерном сосуде
Содержание P ₂ O ₅ , % Content of P ₂ O ₅ , %	ГОСТ 24024.9-81	Экстракция монофосфатов из пробы эфеля в виде фосфорномолибденового аммония смесью органических растворителей с последующим фотометрическим измерением оптической плотности фосфорномолибденовой сини при длине волны 630 нм
Содержание магнитной фракции, % Content of magnetic fraction, %	Магнитная сепарация	Выделение магнитной фракции с помощью неодимовых магнитов с остаточной магнитной индукцией 1,25–1,28 Тесла
Содержание глинистой фракции, % Content of clay fraction, %	ГОСТ 8735-88	Отмучивание частиц крупностью до 0,05 мм из навески эфеля с последующим высушиванием остатка до постоянной массы и взвешиванием
Содержание карбонатов, % Content of carbonates, %	ГОСТ 34467-2018	Разрушение грунта соляной кислотой до постоянной массы
Минералогический состав Mineralogical composition	Петрографический анализ	Микроскопическое исследование состава эфеля с идентификацией минералов на основании морфологических признаков. Рентгенофазный анализ.
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг The specific effective activity of natural radionuclides, Bq/kg	ГОСТ 30108-94	С помощью портативного многофункционального сцинтилляционного гамма-спектрометра МКС-АТ6101Д
Элементный состав Elemental composition	Методика НСАМ 499-ЭАС/МС «Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионными и масс-спектральными методами анализа»	

Результаты и обсуждение

В результате исследований было установлено, что основными компонентами эфелей являются глауконит, кварц, фосфат и глинистые материалы. В небольшом количестве присутствуют кальцит, сидерит, гипс, барит, магнетит. Глинистая фракция представлена глауконитом и гидрослюдами типа иллита и шилкинита. Фосфатный материал представлен фторкарбонатапатитами (по составу приближается к франколиту $\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6(\text{F}_2, [\text{OH}]_2, \text{CO}_3, \text{O})$). Соотношение компонентов в эфелях, складированных на разных участках хвостохранилища, варьирует в широких пределах. На рисунке 1а (см. цветную вкладку) приведена фотография типичного образца эфеля, сделанная с помощью стереоскопического микроскопа. На фотографии хорошо видны зелёные зёрна глауконита и бесцветные, желтоватые или серые зёрна других минералов. Большинство зёрен покрыто вкраплениями гидроксидов железа бурого цвета.

Характерной особенностью глауконитов является значительное содержание железа, что обуславливает их высокую парамагнитность. Удельная магнитная восприимчивость глауконита составляет $63 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$, удельная магнитная восприимчивость фосфорита – $4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$, кварца – $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ [11]. Существенная разница в магнитной восприимчивости позволяет выделять глауконит из эфеля с помощью магнитной сепарации. На рисунке 1 приведены микрофотографии магнитной (1б) и немагнитной (1с) фракций эфеля, выделенных с помощью неодимовых магнитов. Из 28 проанализированных проб, только в двух не удалось выделить магнитную фракцию (МФ). В остальных пробах содержание МФ варьировало от 52 до 81% и в среднем составило 68%. Основным компонентом МФ является глауконит. Сrostки глауконита с другими минералами могут попасть в обе фракции (рис. 2).

Наиболее ценными компонентами эфелей являются фосфор и калий. Согласно полученным данным, среднее содержание P_2O_5 в эфеле находится на уровне $7,9 \pm 1,7\%$. В двух пробах содержание P_2O_5 достигало 10,3–10,5%. В немагнитной фракции (НМФ) массовая доля P_2O_5 варьировала от 13,4 до 22,5% и в среднем составила $17,1 \pm 3,4\%$. В МФ содержание P_2O_5 находилось на уровне $5,5 \pm 0,5\%$. Массовая доля K_2O в эфеле в среднем составила $3,1 \pm 0,7\%$, причём в МФ содержание K_2O было в 3 раза выше, чем в НМФ.

Среднее содержание карбонатов (в пересчёте на CaCO_3) в эфеле находилось на уровне $3,8 \pm 0,9\%$. В НМФ этот показатель достигал 18,5% при среднем содержании $11,3 \pm 4,7\%$. С точки зрения кислотной переработки фосфатного сырья, карбонаты оцениваются как вредные примеси, однако, при использовании эфелей в качестве самостоятельных удобрений, наличие карбонатов можно рассматривать как определённое преимущество, позволяющее снизить кислотность почвы. В кислых почвах фосфаты быстро связываются полуторными оксидами в недоступные для растений соединения. Вносимые с эфелем карбонаты способствуют снижению кислотности и увеличению биодоступности фосфора [12].

Массовая доля глинистой фракции в различных пробах эфеля варьировала от 8 до 40%. В процессе магнитной сепарации основная доля глинистых включений переходила в магнитную фракцию. Очистка эфеля от глинистых частиц позволяла повысить содержание P_2O_5 в очищенном продукте.

Среднее содержание железа (в пересчёте на Fe_2O_3) в эфеле достигало $11,2 \pm 2,5\%$, при этом в МФ данный показатель повышался до 16,8–17,2%, а в НМФ снижался до 1,8–5,2%.

Большое значение для выявления перспектив использования фосфоритов в ОЗ имеет их микроэлементный состав [13–15]. Однако, согласно данным НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.И. Сысина, для экологической оценки фосфатного сырья и фосфорных удобрений достаточно осуществлять их контроль по следующим 16 компонентам: F, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Sr, V, Cr, Pb, Hg, Co, Cd, U, Th, Y, при этом наибольший вклад в экологическую опасность сырья вносят F, As, Sr, Hg, Cd, U, Y [16]. В таблице 2 приведены данные о среднем содержании соответствующих элементов в эфеле и распределении этих элементов по фракциям.

Содержание фтора в отобранных образцах находилось в пределах $1,9 \pm 0,1\%$, при этом в добываемых в настоящее время фосфоритах массовая доля F достигает 3–4% [17]. Распределение F по фракциям было относительно равномерным.

Согласно полученным данным (табл. 2), в МФ концентрируются такие элементы, как V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Cs, Se. В НМФ – Sr, Ba, Mo, Cd, Pb и радиоактивные Th и U, причём содержание U в НМФ более, чем в 3 раза превышает содержание этого элемента в МФ и достигает 22,1 г/т, что, тем не менее, значительно ниже среднего содержания U в фосфо-

Содержание экологически значимых элементов в хвостах обогащения
The content of environmentally significant elements in tailings

Элемент Element	Содержание элемента, мкг/г / Element content, µg/g		
	эфель ephel	немагнитная фракция non-magnetic fraction	магнитная фракция magnetic fraction
V	114,5±20,5	53,5±10,2	128,0±12,5
Cr	161,0±14,1	55,2±8,1	196,0±9,4
Co	75,6±1,5	47,5±1,1	95,4±1,6
Ni	78,3±8,4	42,4±6,2	97,4±7,8
Cu	6,3±0,5	5,1±0,5	7,1±0,3
Zn	107,5±3,5	62,1±2,8	131,0±3,4
As	31,8±4,2	33,4±6,4	25,0±2,4
Se	3,6±0,2	3,2±0,2	4,3±0,4
Y	165,5±8,1	139,0±9,3	186,0±7,5
Cs	2,9±0,2	1,6±0,2	3,8±0,3
Sr	534,5±106,8	1144±189	341±43
Mo	1,6±0,2	2,0±0,2	1,5±0,2
Cd	0,16±0,03	0,25±0,04	0,16±0,03
Ba	250,0±39,6	504,0±40,6	190,0±21,7
Hg	Ниже предела обнаружения / Below detection limit		
Pb	14,5±1,1	19,5±0,9	13,9±1,1
Th	12,4±1,1	19,9±2,1	11,3±2,2
U	10,2±1,6	22,1±1,8	6,7±1,5

ритах осадочного происхождения (75 г/т [17]). Для осадочных фосфоритов вообще характерно повышенное содержание Th и U. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов в фосфоритах, используемых для производства удобрений, может достигать 1200 Бк/кг. Для верхнекамских эфелей этот показатель значительно ниже и не превышает 277 Бк/кг. Таким образом, с точки зрения загрязнения окружающей среды и сельскохозяйственной продукции радиоактивными элементами, верхнекамские фосфориты опасности не представляют.

Для фосфатного сырья отечественных месторождений характерно повышенное содержание Mn, Ni, As, Sr, Pb, Co. В частности, для глауконитовых и желваковых фосфоритов с повышенным содержанием железа типичны высокие концентрации As (до 40 300 мг/кг), Co и Ni (до 40 мг/кг) [19]. Согласно результатам выполненных исследований, по содержанию As верхнекамские эфеля можно считать благополучным сырьём.

Большое значение для характеристики экологической безопасности удобрений имеет содержание Pb. Согласно ГН 2.1.7.2041-06, валовое содержание Pb в почве не должно превышать 32 мг/кг. Содержание Pb в эфелях ниже допустимого для почв уровня более чем в 2 раза. Содержание в эфеле Hg, V

и Mn, также существенно ниже установленных соответствующими нормативами значений. Содержание валового Ni в почвах не нормируется, однако избыток этого элемента приводит к хлорозу, обусловленному недостатком железа. Выявленное содержание Ni в эфелях несколько ниже среднего содержания этого элемента (90 мг/кг) в традиционных минеральных удобрениях [20]. Высокое содержание Ni в почвах наблюдается при внесении этого элемента в дозе более 23 кг/га [21]. Для достижения соответствующего показателя потребуется внести более 300 т эфеля на гектар пашни. Содержание в эфеле Cr, Co, Cu, Zn, Mo относительно невелико, кроме того, эти элементы необходимы для нормального развития растений и почвенной микрофлоры и их наличие можно отнести к преимуществам эфеля как удобрения.

Особый интерес представляет значительное содержание в эфеле Se, что характерно для некоторых фосфатсодержащих пород [22]. В настоящее время проблема дефицита Se в почвах привлекает всё большее внимание учёных. По имеющимся данным, до 90% населения РФ потребляет недостаточное количество этого элемента, что отражается на здоровье и продолжительности жизни [23]. Выраженный дефицит Se характерен для многих территорий РФ (в том числе для Кировской об-

ласти). Содержание Se в эфелях значительно превосходит содержание этого элемента в селенодефицитных почвах. Таким образом, эфеля могут применяться в качестве натуральных селен-содержащих удобрений.

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что химический состав хвостов обогащения Верхнекамского фосфоритного рудника позволяет использовать их в качестве самостоятельного фосфорно-калийного удобрения для органического земледелия. Наиболее рациональным способом переработки эфелей может стать разделение их на НМФ и МФ с последующим использованием НМФ в качестве натурального фосфорного удобрения (типа фосфоритной муки) или в качестве компонента минеральных или органоминеральных удобрений. К ценным свойствам НМФ можно отнести относительно высокое содержание P_2O_5 , низкое содержание токсичных элементов (в частности Cd), наличие примеси глауконита (мелиорант, источник калия и микроэлементов, сорбент тяжёлых металлов). Удобрения на основе эфелей можно позиционировать как источники ценных для питания растений микроэлементов: Mo, Co, Zn, Se. К преимуществам эфелей можно отнести экологическую безопасность, благоприятный элементный состав, низкую себестоимость, соответствие производства удобрений принципам «зелёной» химии.

Литература

1. Bello W.B. Problems and prospect of organic farming in developing countries // *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*. 2008. V. 1. No. 1. P. 36–43.
2. Rigby D., Caceres D. Organic farming and the sustainability of agricultural systems // *Agricultural Systems*. 2001. No. 68. P. 21–40.
3. Харитонов Н.С., Хожаинов Н.Т. Развитие органического сельского хозяйства как фактор роста экспортного потенциала агропромышленного комплекса России // *Никоновские чтения*. 2017. № 22. С. 253–258.
4. Lugon-Moulin N., Ryan L., Donini P., Rossi L. Cadmium content of phosphate fertilizers used for tobacco production // *Agronomy for Sustainable Development*. 2006. V. 26. No. 3. P. 151–155.
5. Han J., Shang Q., Du Y. Review: effect of environmental cadmium pollution on human health // *Health*. 2009. No. 3. P. 159–166.
6. Annexes to the Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council. European Commission. Brussels, 17.3.2016. [Электронный ресурс] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=&uri=CELEX:52016PC0157> (Дата обращения: 21.10.2019).
7. Mar S.S., Masanori O. Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer // *Microchemical Journal*. 2012. No. 104. P. 17–21.
8. Дубейковский С.Г. О границе юрской и меловой систем в пределах Вятско-Камской впадины // *Вопросы геологии Южного Урала и Поволжья*. 1969. Вып. 5. Ч. 1. С. 100–113.
9. Дружинин Г.В. Геологический отчёт «Материалы оценки прогнозных ресурсов хвостов обогащения (эфелей) Верхнекамского фосфоритного рудника. Пояснительная записка». Киров: ФБУ «ТФГИ по Приволжскому Федеральному округу», 2017. 14 с.
10. Рубцов Ю.С., Абрамичев Н.А. Отчёт по работе «Изучение вещественного состава и технологических свойств конкреционных фосфоритовых руд Вятско-Камского месторождения Кировской области в связи с переориентацией их использования на кислотную переработку» 1981–1983 гг. Киров: ФБУ «ТФГИ по Приволжскому Федеральному округу». 160 с.
11. Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Гончарик И.И., Шевчук В.В. Влияние обжига на физико-химические свойства основных рудообразующих минералов фосфоритов // *Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі. Сeryя хімічных навук*. 2012. № 1. С. 107–112.
12. Haynes R. J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils // *Plant and Soil*. 1982. V. 68. P. 289–308.
13. Bech J., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Delgado R., Suarez M., Lansac A., Roca N. Selenium and other trace element in phosphorites: A comparison between those of the Bayovar-Sechura and other provenances // *Journal of Geochemical Exploration*. 2010. V. 107. No. 2. P. 146–160.
14. Al-Hwaiti M., Matheis G., Saffarini G. Mobilization, redistribution and bioavailability of potentially toxic elements in Shidiya phosphorites // *Southeast Jordan. Env Geol*. 2005. No. 47. P. 431–444.
15. Khater A. Uranium and heavy metals in Phosphate Fertilizers // *Uranium, Mining and Hydrogeology*. 2008. No. 9. P. 193–198.
16. Киперман Ю.А., Скоробогатов В.И., Антонец Т.А., Казақ В.Г., Ангелов А.И. Эколого-геохимическая оценка агрономических руд и продуктов их переработки // *ГИАБ*. 1995. № 1. С. 44–48.
17. Denzinger H.F.J., Konig H.J., Kruger G.E.W. Fluorine recovery in the fertilizer industry – A review // *Phosphor. Potassium*. 1979. V. 103. P. 33–39.
18. Baturin G.N., Kochenov A.V. Uranium in Phosphorites // *Lithology and Mineral Resources*. 2001. No. 36. P. 303–321.
19. Янин Е.П. Источники и пути поступления тяжёлых металлов в реки сельскохозяйственных районов // *Экологическая экспертиза*. 2004. № 4. С. 67–90.
20. Gambus F., Wiczorek J. Pollution of fertilizers with heavy metals // *Ecological Chemistry and Engineering*. A. 2012. V. 19. No. 4–5. P. 353–360.

21. Андриенко Л.Н., Аксенова Ю.В. Влияние внесения кадмия, никеля, цинка на уровень содержания их в почве, урожайность и качество корнеплодов овощных культур // Земледелие. 2018. № 8. С. 23–25.

22. Bech J., Suarez M., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Bech J., Lansac. A. Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar–Sechura (Peru) // Journal of Geochemical Exploration. 2010. V. 107. No. 2. P. 136–145.

23. Аристархов А.Н., Бусыгин А.С., Яковлева Т.А. Дефицит селена в почвах и растениях Северо-Восточного Нечерноземья как индикатор необходимости применения селеновых удобрений // Международный сельскохозяйственный журнал. 2018. № 1. С. 31–36.

References

1. Bello W.B. Problems and prospect of organic farming in developing countries // Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management. 2008. V. 1. No. 1. P. 36–43.

2. Rigby D., Caceres D. Organic farming and the sustainability of agricultural systems // Agricultural Systems. 2001. No. 68. P. 21–40.

3. Kharitonov N.S., Khozhainov N.T. The development of organic agriculture as a factor in the growth of export potential of the agricultural sector of Russia // Nikonovskiye chteniya. 2017. No. 22. P. 253–258 (in Russian).

4. Lugon-Moulin N., Ryan L., Donini P., Rossi L. Cadmium content of phosphate fertilizers used for tobacco production // Agronomy for Sustainable Development. 2006. V. 26. No. 3. P. 151–155. doi: 10.1051/agro:2006010

5. Han J., Shang Q., Du Y. Review: effect of environmental cadmium pollution on human health // Health. 2009. No. 3. P. 159–166. doi: 10.4236/health.2009.13026

6. Annexes to the Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council. European Commission. Brussels, 17.3.2016. [Internet resource] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=&uri=CELEX:52016PC0157> (Accessed: 21.10.2019).

7. Mar S.S., Masanori O. Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer // Microchemical Journal. 2012. No. 104. P. 17–21 (in Russian). doi: 10.1016/j.microc.2012.03.020

8. Dubeykovsky S.G. About the border of the Jurassic and Cretaceous systems within the Vyatka-Kama depression // Voprosy geologii Yuzhnogo Urala i Povolzh'ya. 1969. Issue 5. Part 1. P. 100–113 (in Russian).

9. Druzhinin G.V. Geological report Materials for assessing the estimated resources of enrichment tailings (ephels) of the Verkhnekamsk phosphorite mine. Explanatory Note. Kirov: FBU “TFGI for the Volga Federal District”, 2017. 14 p. (in Russian).

10. Rubtsov Yu.S., Abramychev N.A. Report on the work “Study of the material composition and technological properties of nodule phosphorite ores of the Vyatka-Kama deposit in the Kirov region in connection with the reorien-

tation of their use to acid processing” 1981–1983. Kirov: Federal State Budgetary Institution “TFGI for the Volga Federal District”. 160 p. (in Russian).

11. Mozheiko F.F., Potkina T.N., Goncharik I.I., Shevchuk V.V. The effect of firing on the physicochemical properties of the main ore-forming minerals of phosphorites // Vestsi natsyyanalnay akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk. 2012. No. 1. P. 107–112 (in Russian).

12. Haynes R. J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils // Plant and Soil. 1982. V. 68. P. 289–308.

13. Bech J., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Delgado R., Suarez M., Lansac A., Roca N. Selenium and other trace element in phosphorites: A comparison between those of the Bayovar-Sechura and other provenances // Journal of Geochemical Exploration. 2010. V. 107. No. 2. P. 146–160. doi: 10.1016/j.gexplo.2010.04.002

14. Al-Hwaiti M., Matheis G., Saffarini G. Mobilization, redistribution and bioavailability of potentially toxic elements in Shidiya phosphorites // Southeast Jordan. Env Geol. 2005. No. 47. P. 431–444. doi: 10.1007/s00254-004-1173-2

15. Khater A. Uranium and heavy metals in Phosphate Fertilizers // Uranium, Mining and Hydrogeology. 2008. No. 9. P. 193–198. doi: 10.1007/978-3-540-87746-2_26

16. Kiperman Yu.A., Skorobogatov V.I., Antonets T.A., Kazak V.G., Angelov A.I. Ecological and geochemical assessment of agronomic ores and products of their processing // GIAB. 1995. No. 1. P. 44–48 (in Russian).

17. Denzinger H.F.J., Konig H.J., Kruger G.E.W. Fluorine recovery in the fertilizer industry – A review // Phosphor. Potassium. 1979. V. 103. P. 33–39.

18. Baturin G. N., Kochenov A. V. Uranium in Phosphorites // Lithology and Mineral Resources. 2001. No. 36. P. 303–321.

19. Yanin E.P. Sources and routes of heavy metals entering rivers of agricultural regions // Ekologicheskaya ekspertiza. 2004. No. 4. P. 67–90 (in Russian).

20. Gambus F., Wiczorek J. Pollution of fertilizers with heavy metals // Ecological Chemistry and Engineering. A. 2012. V. 19. No. 4–5. P. 353–360. doi: 10.2428/ecea.2012.19(04)036

21. Andrienko L.N., Aksenova Yu.V. The effect of application cadmium, nickel, zinc on the level of their content in the soil, yield and quality of root of vegetable crops // Zemledelie. 2018. No. 8. P. 23–25 (in Russian). doi: 10.24411/0044-3913-2018-10807

22. Bech J., Suarez M., Reverter F., Tume P., Sanchez-Algarra P., Bech J., Lansac. A. Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar–Sechura (Peru) // Journal of Geochemical Exploration. 2010. V. 107. No. 2. P. 136–145. doi: 10.1016/j.gexplo.2009.08.004

23. Aristarkhov A.N., Busygin A.S., Yakovleva T.A. Selenium deficiency in soils and plants of the North-Eastern Non-Black Earth Region as an indicator of the need for selenium fertilizers // Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal. 2018. No. 1. P. 31–36 (in Russian). doi: 10.24411/2587-6740-2018-11008

Геоморфологические аспекты проблемы защиты населённых пунктов на берегах морей в высоких широтах

© 2020. В. В. Афанасьев¹, к. г. н., зав. лабораторией, Е. И. Игнатов², д. г. н., профессор,

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1-В,

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, e-mail: vvasand@mail.ru, gn38@mail.ru

Традиционный уклад жизни аборигенных народов побережья Арктики, наряду с максимальным приближением к объектам промысла, учитывал и особенности строения побережья, используя для поселения и хозяйственной деятельности песчано-галечные аккумулятивные бары и косы. В условиях вечной мерзлоты зачастую это были единственно возможные места для постоянного проживания. В работе рассматриваются проблемы, связанные с защитой населённых пунктов, расположенных на побережье Охотского, Чукотского и Берингова морей, главным образом, на голоценовых песчано-галечных аккумулятивных образованиях (барьерных островах и косах). Сравниваются подходы к решению проблемы на берегах Аляски, Чукотки, Камчатки, Западного Приохотья и Сахалина. Показано развитие берегозащитных технологий на арктических и субарктических берегах. Сделан вывод, что обоснование проектных решений не всегда соответствует уровню современных знаний о динамике берегов. Как правило, в основе определения долгосрочных тенденций размыва проблемных участков побережья лежит лишь интерполяция среднемноголетних данных, полученных при анализе материалов дистанционного зондирования. Применительно к проблеме защиты берегов рассмотрены тенденции размыва прибрежных равнин и динамики голоценовых аккумулятивных форм. Отмечена специфика геоморфологических процессов на арктических и субарктических берегах. Сделан вывод о том, что на основе полного набора данных о развитии и динамике прибрежной зоны рассмотренных морей, возможны биопозитивные и безопасные берегозащитные решения.

Ключевые слова: размыв берегов, замёрзший пляж, арктическое побережье, субарктические моря.

Geomorphological aspects of protection of coast settlements in high latitudes

© 2020. V. V. Afanasiev¹ ORCID: 0000-0002-2344-1269, E. I. Ignatov² ORCID: 0000-0001-9316-1062²

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, 1-B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 693022,

²Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991, e-mail: vvasand@mail.ru, gn38@mail.ru

The problems related to the protection of settlements located on the coast, mainly on Holocene sand – pebble accumulative formations (barrier islands and spits) of the Okhotsk, Chukchi and Bering seas are considered. Approaches to solving the problem on the shores of Alaska, Chukotka, Kamchatka, Western Priokhotye and Sakhalin are compared. The evolution of coastal protection solutions on the Arctic and subarctic coasts is shown. It is concluded that the justification of the design solutions does not always correspond to the level of modern knowledge about the dynamics of the shores. At the same time, the basis for determining long-term trends of erosion of problem areas of the coast is the interpolation of the long-term average data obtained at the analysis of remote sensing materials. With reference to the problem of protecting the coast, the main trends of erosion of coastal plains and dynamics of Holocene accumulative forms are considered. Specific features of geomorphological processes on the Arctic and subarctic coasts were noted. During the period of intensive industrial development of the coast of Chukchi, Bering and Okhotsk seas the settlements, that are the most suffering from the erosion of the shores Shishmaref, Kivalina, Unalakleet, have been created. These settlements are located directly at the distal ends of the grids of the system of the lagoon strait. Accordingly, coastal protection solutions should be based on the analysis of migration of the strait, the possibility of changes in the direction of growth, form and morphometric parameters of the distal ends of the grids, modification of the tidal prism. It should be noted that these areas of the coast have enough sediment for any engineering solutions in this direction. It is also necessary to pay attention to considerable deterioration of wave-damping properties of beach deposits at their freezing.

Keywords: coastal erosion, freezing beach, Arctic coast, Subarctic seas.

Большой интерес представляют экологические аспекты взаимодействия береговых геоморфологических систем с человеком и его жизнедеятельностью в высоких широтах. Диапазон параметров биосферы, в которых может существовать человек, здесь один из самых узких на Земле, и весьма важную роль при освоении этих регионов играли геоморфологические условия и устойчивость береговых морфолитосистем. К сожалению, уровень палеогеографической и археологической изученности не позволяет нам опереться в данной работе на палеодемографическую модель расселения в динамических прибрежных ландшафтах. Но очевидно, что постоянные посёлки возникали, в первую очередь, на местах поселений вымерших или эмигрировавших общин, временных промысловых стоянок и сезонных охотничьих лагерей, которые на протяжении жизни нескольких поколений не испытывали разрушающего воздействия моря. Именно высокий уровень специализации жизнеобеспечения и изобилие морских промысловых ресурсов обусловили в XIX – начале XX веков на северо-восточном побережье России и северо-западном побережье Северной Америки одну из самых высоких в приполярном ареале плотность населения береговых охотников – до 3 чел./км² [4]. В период промышленного освоения этих территорий среди критериев выбора места для расположения промышленного объекта или посёлка опыт местного населения играл весьма значительную роль.

Мы не можем утверждать, что катастрофические подьёмы уровня и размыв береговых аккумулятивных форм арктических и субарктических морей в результате серии штормов исключительной силы, аналогичных наблюдаемым в конце XIX – начале XX веков на южном побережье полуострова Сьюард [2], обходили эти поселения стороной. Тем не менее, свидетельств тому, что они являлись катастрофическими в рамках традиционной системы жизнеобеспечения, у нас нет. И, напротив, в условиях промышленного освоения побережья усиление размыва берегов Берингова и Охотского морей, начавшееся в 30–40-х годах XX века, стало серьёзным вызовом безопасности населённых пунктов побережья и инфраструктуры [3].

Как отмечается в отчёте по оценке климата на Аляске, изменения климата происходят гораздо быстрее, чем прогнозировалось ранее [4]. В условиях Арктики перестройка гидрометеорологического режима и повышение

температуры воздуха в последние десятилетия, изменяющие параметры и продолжительность волнового воздействия на берега, привели также к увеличению длины разгона и соответственно параметров ветровых волн, что ещё более увеличило энергетику береговой зоны и повысило риски для традиционного образа жизни населения [5].

Целью работы было описать геоморфологические аспекты проблемы защиты населённых пунктов на берегах морей в высоких широтах.

Проблемы защиты берегов Охотского моря и российского побережья Чукотского и Берингова морей

На берегах Чукотского моря преобладают береговые формы, созданные волнением [6]. Но в настоящее время, в условиях усиления волновой активности подверженность берегов Чукотского моря процессам абразии самая низкая из северных морей России [7]. К тому же, на сотнях километров морского побережья расположено всего несколько населённых пунктов. В районе западного входа в пролив Лонгана на бере лагуны расположен национальный посёлок Биллингс с населением около 200 человек. Особенности морфолитодинамики береговой зоны, обусловленные малой шириной и глубиной прибрежной летней полыньи, на которой развивается ветровое волнение, а также характером атмосферной циркуляции в тёплый период, таковы, что постройки располагаются практически на пляже и переносить их нет необходимости. В отличие от с. Биллингс, расположенного на типичном лагунном бере, п. Ванкарем находится на томболо, сформированном в волновой тени одноимённого скалистого мыса на дистальном окончании западной лагунной косы. Посёлки Инчоун, Уэллен, Нешкан, Мыс Шмидта расположены на прикорневых участках лагунных пересыпей также непосредственно у коренных участков суши, активно разрушаемых морозным выветриванием, и которые являются мощным источником наносов, обеспечивающих устойчивость аккумулятивных образований.

На Берингоморском побережье Чукотки в настоящее время все населённые пункты расположены в закрытых бухтах и на высоких террасах. Однако еще в начале века весь этот берег был плотно заселён, здесь насчитывалось несколько десятков аборигенных поселков и стойбищ, жители которых были впоследствии

собраны в крупных поселениях [4]. Одной из основных причин переселения, наряду со сменой системы жизнеобеспечения, называется деградация голоценовых береговых аккумулятивных образований, на которых располагались эти поселения [8].

Проблема защиты берегов не обозначена в нормативно-правовых актах Камчатской области. Тем не менее, она существует. В связи со сменой технологий обработки рыбы часть посёлков, созданных при рыбных базах, была закрыта уже в 60–70-е годы XX века. Затем последовала волна укрупнений населённых пунктов, затронувшая преимущественно национальные села. После землетрясения 2007 г. был расселён п. Корф, расположенный на одноименной косе. Таким образом, проблема берегозащиты потеряла свою остроту. Но в настоящее время жители сёл Ильпырское, Ивашка, Апука и Пахачи на северо-востоке Камчатки общей численностью 1260 человек защищают свои дома подручными средствами, главным образом, старыми баржами и рыболовными судами. Такие населённые пункты как п. Оссора, п. Карага, с. Вывенка, с. Кострома, с. Тиличики, расположенные на закрытых от волнения низких аккумулятивных террасах и косах с устойчивым питанием наносами, проблем с размывом берегов в настоящее время не имеют.

Более известна проблема с размывом и защитой берегов на Западно-Камчатском побережье [9]. И если небольшие посёлки и рыбные базы здесь уже давно прекратили своё существование, то п. Октябрьский с населением 1600 человек, расположенный на Октябрьской косе, до сих пор борется с морской стихией.

На южных берегах Охотского моря, также относимых нами к субарктическому типу, и на Сахалинском побережье Татарского пролива в настоящее время вполне морфолитодинамическое обоснование и проектирование более 30 км берегозащитных сооружений, из которых около 17 км уже построено [10]. Тем не менее, и здесь приходят в упадок и поглощаются морем прибрежные города и посёлки, разрушаются портовые сооружения и даже имеющиеся проекты защиты г. Красногорск, г. Углегорск, п. Взморье не реализуются десятилетиями.

Проблемы защиты восточных берегов Чукотского и Берингова морей

Изменения окружающей среды, с которыми связываются ускоренные темпы эро-

зии и наводнения, угрожающие общинам в прибрежных районах на Аляске находятся под пристальным вниманием [11]. В 2006 г. из 7 населённых пунктов, требующих первоочередного внимания, 4 находились непосредственно в береговой зоне. Национальные посёлки Шишмарев и Кивалина (общей численностью населения 997 человек) были рекомендованы к переселению, оцененному в 250–305 млн долларов, а для поселков Кактовик и Уналаклит (общая численность населения в 2016 г. составляла 949 человек) предполагалась берегозащита стоимостью около 70 млн долларов [12]. В 2009 г. первоочередного решения требовали проблемы уже 10 береговых населённых пунктов [13]. Общая протяжённость берегозащиты на восточных берегах Чукотского моря в настоящее время составляет около 2,8 км волногасящих конструкций откосного типа и сэндбэгов, а также около 2 км каменной наброски. На восточных берегах Берингова моря построено чуть более 3 км берегозащиты. Берегозащитные конструкции на восточных берегах Чукотского и Берингова морей прошли эволюционный путь от деревянных волноотбойных стенок и бочек, заполненных песком, до габионных стенок, сэндбэгов, геотуб, бетонных матов и волногасящих откосных сооружений. Город Барроу пытались защищать искусственным пляжем из морских наносов, полученных при дноуглублении. Используются также песчаная обваловка и стабилизация дюн. На самых проблемных участках, расположенных на барьерных формах и косах, в настоящее время построены именно волногасящие сооружения откосного типа; национальное село Уналаклит (400 м), национальное село Кивалина (730 м), национальное село Шишмарев (800 м).

Геоморфологические аспекты решения проблемы берегозащиты

Как показывает обзор проблемы, берегозащита необходима в первую очередь населённым пунктам, расположенным на голоценовых песчано-галечных аккумулятивных образованиях (барьерных островах и косах). Только два защищаемых населённых пункта – Барроу и Уэйнрайт – расположены на 5–15 м террасах побережья с высоким содержанием в отложениях берегового уступа подземного льда. Без сомнения, из-за наличия вечной мерзлоты, сезонно-мёрзлых пород в зоне пляжа и контакта припайных льдов со льдом, специфики гидродинамического режима, эрозия берего-

вых линий в умеренных, субарктических и арктических регионах имеет существенные различия [14, 15]. Однако, несмотря на определённую разницу в действующих механизмах, количественное различие в интенсивности и активности абразионных и термоабразионных арктических побережий может быть менее значительным, чем принято считать [16].

На основе анализа данных дистанционного зондирования многие авторы отмечают, что, начиная с середины прошлого века и до настоящего времени, происходит увеличение скорости размыва берегов [17, 18]. Но, следует отметить, что буквально в последних работах при анализе динамики арктических побережий начали учитываться морфогенетические типы берегов. При этом выяснилось, что минимальные перемещения отмечены для кос и баров, а максимальные скорости размыва наблюдаются для береговых уступов равнин, сформированных при спуске озёр [19, 20]. Интересно, что песчаные и гравийно-галечные барьерные острова на дельтовых побережьях также стабильны либо нарастают [21, 22].

Увеличение накопления наносов в областях унаследованной аккумуляции при усилении размыва берегов, наблюдаемого с 40-х годов прошлого века, установлено нами при анализе изменений морфометрических показателей аккумулятивных образований Охотоморского побережья [23]. Аккумулятивные формы, морфодинамический облик которых сформировался в период последнего ритма позднеголоценовой прибрежно-морской аккумуляции, связанного с подъёмом уровня океана, перестраиваются, но в условиях незначительных, менее 1 метра, приливов и короткого периода волнового воздействия достаточно стабильны. В частности, это относится к барам лагуны Элсон и барам в районе п. Биллингс. Скорости разрушения берегов лагун здесь существенно выше скоростей перемещения баров, кроме того площадь лагун увеличивается также за счёт присоединения термокарстовых озёр.

В качестве основного результата дистанционных исследований берегов можно принять выводы о том, что наблюдаемая пространственная структура размыва в основных чертах существует, по меньшей мере, с 30-х годов XX века. Плановые перестройки барьерных форм и кос (уменьшение, увеличение площади) в значительной мере связаны именно с механизмами развития этих форм, обусловленными параметрами вдольбереговых перемещений наносов, тенденциями смеще-

ния лагунных проливов, сезонными особенностями строения берегового профиля [24]. Штормовые переливы и эрозия, без сомнения, представляют опасность на берегах этого типа. Вместе с тем риски многократно увеличиваются при игнорировании естественных механизмов и тенденций развития аккумулятивных образований. Именно по этой причине берегозащита в п. Шишмарев в период между 1983 и 2003 гг. привела к низовым размывам и скорости эрозии, вдвое превышающей уровень незащищаемых берегов. А вот построенное недавно волногасящее сооружение откосного типа из рваного камня, которое обеспечило устойчивость аккумулятивного образования в системе сезонной морфолитодинамики, защитило поселок от эрозии даже при аномально сильных южных ветрах «Великой бури 2011 года» [3].

Заключение

Можно утверждать, что поселения, имеющие продолжительную историю, расположены на участках унаследованной аккумуляции, в прикорневых зонах баров и кос, а также на аккумулятивных образованиях типа томболо в волновой тени участков суши, сложенных коренными породами. Именно эти участки были относительно стабильны на протяжении всех ритмов аккумуляции и размыва, обусловленных изменениями уровня моря в последние 6,5 тыс. лет с амплитудой 2–4 м. Прибрежные болотистые равнины в большинстве случаев вообще не пригодны для постоянных поселений. Таким образом, наряду с биопродуктивностью прибрежных акваторий рельеф сформировал экологический каркас среды жизни человека в высоких широтах.

Изменения интенсивности размыва берегов в XX–XXI веках отмечены на всех рассматриваемых морях. Обострение ситуации в последние десятилетия, скорее всего, не является чем-то из ряда вон выходящим. Однако уровень комфорта и требований безопасности населения сейчас куда выше, чем сто лет назад. Населённые пункты, наиболее страдающие в настоящее время от переформирования берегов – Шишмарев, Кивалина, Уналаклит, расположены непосредственно на дистальных окончаниях кос системы лагунного пролива. Соответственно берегозащитные решения должны иметь в своей основе анализ миграций пролива, возможностей изменений направления роста, формы и морфометрических параметров дистальных окончаний кос, модификации приливной призмы. Следует

отметить, что на данных участках побережья достаточно наносов для любых инженерных решений в этом направлении.

Кроме того, при решении проблемы защиты и планировании деятельности на побережье холодных морей следует обратить самое пристальное внимание на специфику эрозионного берегового процесса субарктического и арктического типа. Перспективы в этом направлении открывают выявленные нами деформации подводного рельефа под припайными льдами и увеличение крутизны верхней части берегового профиля при формировании наледи, а также установленный нами факт существенного ухудшения волногасящих свойств пляжевых отложений при их промерзании [25].

Литература

1. Крупник И.И. Арктическая этноэкология (модели традиционного природопользования морских охотников и оленеводов Северной Евразии). М.: Наука, 1989. 272 с.
2. Mason O.K., Salmon D.K., Ludvig S.L. The periodicity of storm surges in the Bering Sea from 1898 to 1993, based on newspapers accounts // *Journal of Climatic Change*. 1996. No. 34. P. 109–123.
3. Mason O.K., Jordan J.W., Lestak L., Manley W.F. Narratives of shoreline erosion and protection at Shishmaref, Alaska: The anecdotal and the analytical // *Pitfalls of Shoreline Stabilization*. Dordrecht: Springer, 2012. P. 73–92.
4. Markon C.J., Trainor S.F., Chapin III F.S. The United States national climate assessment – Alaska technical regional report U.S. Geological Survey. Reston: VA, 2012. No. 1379. 148 p.
5. Polyak L., Alley R.B., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Cronin T.M., Darby D.A., Jennings A.E. History of sea ice in the Arctic // *Journal of Quaternary Science Reviews*. 2010. No. 29. No. 15–16. P. 1757–1778.
6. Ионин А.С., Каплин П.А., Леонтьев О.К., Медведев В.С., Никифоров Л.Г., Павлидис Ю.А., Щербачев Ф.А. Особенности формирования рельефа и современных осадков в прибрежной зоне дальневосточных морей СССР. М.: Наука, 1971. 184 с.
7. Молчанов В.П., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. 300 с.
8. Каплин П.А., Поротов А.В. Особенности развития пересыпей Восточной Чукотки в условиях повышения уровня моря // *Геоморфология*. 2002. № 1. С. 74–82.
9. Зенкович В. П., Леонтьев О.К., Никифоров Л.Г., Лукьянова С.А. К геоморфологии западного побережья Камчатки // *Геоморфология и литология береговой зоны морей и других крупных водоёмов*. М.: Изд-во Наука, 1971. С. 3–8.
10. Афанасьев В.В. Геоморфологические аспекты проблемы защиты берегов острова Сахалин // *Геоморфология*. 2015. № 2 (182). С. 28–37.
11. Villages A.N. Most are affected by flooding and erosion, but few qualify for federal assistance. Washington, DC: Government Accountability Office, 2003. 85 p.
12. Alaska village erosion technical assistance program: An examination of erosion issues in the communities of Bethel, Dillingham, Kaktovik, Kivalina, Newtok, Shishmaref, and Unalakleet. USACE: US Army Corps of Engineers, Alaska District, 2006. 44 p.
13. Alaska baseline erosion assessment: Study findings and technical report. USACE: US Army Corps of Engineers, Alaska District, 2009. 65 p.
14. Are F.E., Grigoriev M.N., Hubberten H.W., Rachold V., Razumov S.O., Schneider W. Comparative shore face evolution along the Laptev Sea coast // *Polarforschung*. 2002. No. 70. P. 135–150.
15. Совершаев В.А., Воскресенский К.С., Камалов А.М., Романенко Ф.А. Развитие береговых аккумулятивных форм в условиях криолитозоны // *Динамика арктических побережий России*. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 80–92.
16. Leont'yev I.O. Coastal profile modeling along the Russian Arctic coast // *Coastal Engineering*. 2004. V. 51. No. 8–9. P. 779–794.
17. Brown J., Jorgenson M.T., Smith O.P., Lee W. Long-term rates of coastal erosion and carbon input, Elson Lagoon, Barrow, Alaska // *Permafrost: Proceedings of the 8th Intern. conf. on Permafrost*. Zürich, 2003. P. 101–106.
18. Overeem I., Anderson R. S., Wobus C.W., Clow G.D., Urban F. E., Matell N. Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. No. 17. P. L17503.
19. Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A., Flint P.L. Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. No. 3. P. L03503.
20. Gibbs A.E., Richmond B.M. National assessment of shoreline change – Summary statistics for updated vector shorelines and associated shoreline change data for the north coast of Alaska, U.S. – Canadian border to Icy Cape. U.S. Geological Survey Open-File Report 2017–1107, 2017. 24 p.
21. Grigoriev M.N., Are F.E., Hubberten H.-W., Razumov S.O., Rachold V. Shore dynamics on the northwest coast of the Lena Delta, Laptev Sea, Siberia // *Proceedings of the International conf. on Arctic Coastal Dynamics*. Potsdam (Germany), 2001. P. 17.
22. Jorgenson M.T., Brown J. Classification of the Alaskan Beaufort Sea coast and estimation of carbon and sediment inputs from coastal erosion // *Geo-Marine Letters*. 2005. V. 25. No. 2–3. P. 69–80.
23. Афанасьев В.В., Уба А.В. Средне-позднеголоценовые аккумулятивные образования северо-западного побережья острова Сахалин: происхождение, история и современная динамика // *Вестник ДВО РАН*. 2017. № 1. С. 12–17.

24. Леонтьев И.О., Афанасьев В.В. Динамика лагунного берега северо-восточного Сахалина на примере системы Ныйского залива и косы Пластун // *Океанология*. 2016. Т. 56. С. 556–571.

25. Afanasiev V.V. Development of the coastal zone of the subarctic seas in the transition of average daily temperatures to the freezing values // 9th International Conference on Geomorphology. New Delhi, 2017. P. 149.

References

1. Krupnik I.I. Arctic ethnoecology (models of traditional nature management of sea hunters and reindeer herders of Northern Eurasia. Moskva: Nauka, 1989. 272 p. (in Russian).
2. Mason O.K., Salmon D.K., Ludvig S.L. The periodicity of storm surges in the Bering Sea from 1898 to 1993, based on newspapers accounts // *Journal of Climatic Change*. 1996. No. 34. P. 109–123. doi: 10.1007/bf00139256
3. Mason O.K., Jordan J.W., Lestak L., Manley W.F. Narratives of shoreline erosion and protection at Shishmaref, Alaska: The anecdotal and the analytical // *Pitfalls of Shoreline Stabilization*. Dordrecht: Springer, 2012. P. 73–92. doi: 10.1007/978-94-007-4123-2_5
4. Markon C.J., Trainor S.F., Chapin III F.S. The United States national climate assessment – Alaska technical regional report U.S. Geological Survey. Reston: VA. 2012. No. 1379. 148 p.
5. Polyak L., Alley R. B., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Cronin T. M., Darby D.A., Jennings A.E. History of sea ice in the Arctic // *Journal of Quaternary Science Reviews*. 2010. No. 29. No. 15–16. P. 1757–1778. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.02.010
6. Ionin A.S., Kaplin P.A., Leontyev O.K., Medvedev V.S., Nikiforov L.G., Pavlidis Yu.A., Shcherbakov F.A. Features of the formation of relief and modern sediments in the coastal zone of the Far Eastern seas of the USSR. Moskva: Nauka, 1971. 181 p. (in Russian).
7. Molchanov V.P., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Risks of emergencies in the Arctic zone of the Russian Federation. Moskva: FGBU VNII GOChS (FC), 2011. 300 p. (in Russian).
8. Kaplin P.A., Porotov A.V. Peculiarities of development of the East Siberian Chukotka overgrasses in conditions of rising sea level // *Geomorfologiya*. 2002. No. 1. P. 74–82 (in Russian).
9. Zenkovich V.P., Leontyev O.K., Nikiforov L.G., Lukyanova S.A. To the geomorphology of the western coast of Kamchatka // *Geomorfologiya i litologiya beregovoy zony morej i drugih krupnyh vodoemov*. Moskva: Nauka, 1971. P. 3–8 (in Russian).
10. Afanasiev V.V. Geomorphological aspects of the protection of the coast of Sakhalin Island // *Geomorfologiya*. 2015. No. 2. No. 182. P. 28–37 (in Russian). doi: 10.15356/0435-4281-2015-2-28-37
11. Villages A.N. Most are affected by flooding and erosion, but few qualify for federal assistance. Washington, DC: Government Accountability Office, 2003. 85 p.
12. Alaska village erosion technical assistance program: An examination of erosion issues in the communities of Bethel, Dillingham, Kaktovik, Kivalina, Newtok, Shishmaref, and Unalakleet. USACE: US Army Corps of Engineers, Alaska District, 2006. 44 p.
13. Alaska baseline erosion assessment: Study findings and technical report. USACE: US Army Corps of Engineers, Alaska District, 2009. 65 p.
14. Are F.E., Grigoriev M.N., Hubberten H.W., Rachold V., Razumov S.O., Schneider W. Comparative shoreface evolution along the Laptev Sea coast // *Polarforschung*. 2002. No. 70. P. 135–150. doi: 10.2312/polarforschung.70.135
15. Sovershaev V.A., Voskresensky K.S., Kamalov A.M., Romanenko F.A. Development of coastal accumulative forms under conditions of cryolithozone // *Dinamika arkticheskikh poberezhnyh Rossii*. Moskva: Izd-vo MGU, 1998. P. 80–92 (in Russian).
16. Leont'yev I.O. Coastal profile modeling along the Russian Arctic coast // *Coastal Engineering*. 2004. V. 51. No. 8–9. P. 779–794. doi: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.009
17. Brown J., Jorgenson M.T., Smith O.P., Lee W. Long-term rates of coastal erosion and carbon input, Elson Lagoon, Barrow, Alaska // *Permafrost: Proceedings of the 8th Intern. conf. on Permafrost*. Zürich, 2003. P. 101–106.
18. Overeem I., Anderson R. S., Wobus C.W., Clow G.D., Urban F. E., Matell N. Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. No. 17. P. L17503. doi: 10.1029/2011gl048681
19. Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A., Flint P.L. Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. No. 3. P. L03503. doi: 10.1029/2008gl036205
20. Gibbs A.E., Richmond B.M. National assessment of shoreline change – Summary statistics for updated vector shorelines and associated shoreline change data for the north coast of Alaska, U.S. – Canadian border to Icy Cape. U.S. Geological Survey Open-File Report 2017–1107, 2017. 21 p. doi: 10.3133/ofr20171107
21. Grigoriev M.N., Are F.E., Hubberten H.-W., Razumov S.O., Rachold V. Shore dynamics on the northwest coast of the Lena Delta, Laptev Sea, Siberia // *Proceedings of the International conf. on Arctic Coastal Dynamics*. Potsdam (Germany), 2001. P. 17.
22. Jorgenson M.T., Brown J. Classification of the Alaskan Beaufort Sea coast and estimation of carbon and sediment inputs from coastal erosion // *Geo-Marine Letters*. 2005. V. 25. No. 2–3. P. 69–80. doi: 10.1007/s00367-004-0188-8
23. Afanasiev V.V., Uba A.V. Middle-Late Holocene accumulative formations of the northwestern coast of Sakhalin Island: origin, history and modern dynamics // *Vestnik DVO RAN*. 2017. No. 1. P. 12–17 (in Russian).
24. Leont'yev I.O., Afanasiev V.V. Dynamics of the lagoon coast of northeastern Sakhalin on the example of the Nyisky Bay system and the Plastun spit // *Okeanologiya*. 2016. V. 56. P. 564–571 (in Russian). doi: 10.1134/s0001437016030139
25. Afanasiev V.V. Development of the coastal zone of the subarctic seas in the transition of average daily temperatures to the freezing values // 9th International Conference on Geomorphology. New Delhi, 2017. P. 149.

Т. И. КУТЯВИНА, В. В. РУТМАН, Т. Я. АШИХМИНА
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ВОДОЁМА
И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ», С. 42

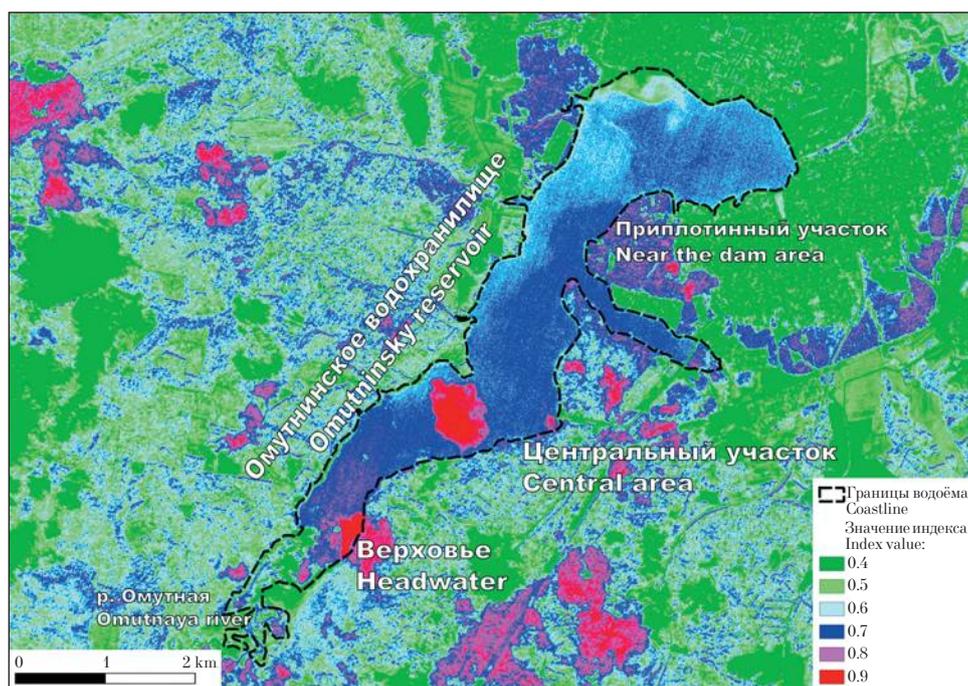


Рис. 2. Значения индекса концентрации хлорофилла *a* на карте-схеме Омутнинского водохранилища, построенной по результатам дешифрирования (07.09.2019)
Fig. 2. The values of the concentration index of chlorophyll *a* on the map-diagram of the Omutninsk reservoir, based on the results of interpretation (07.09.2019)

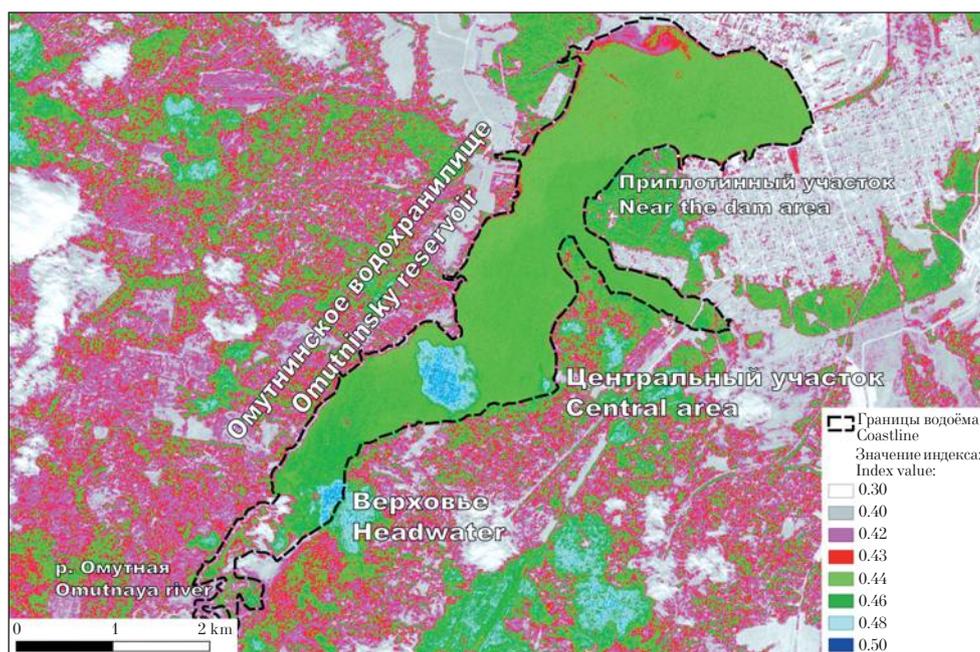
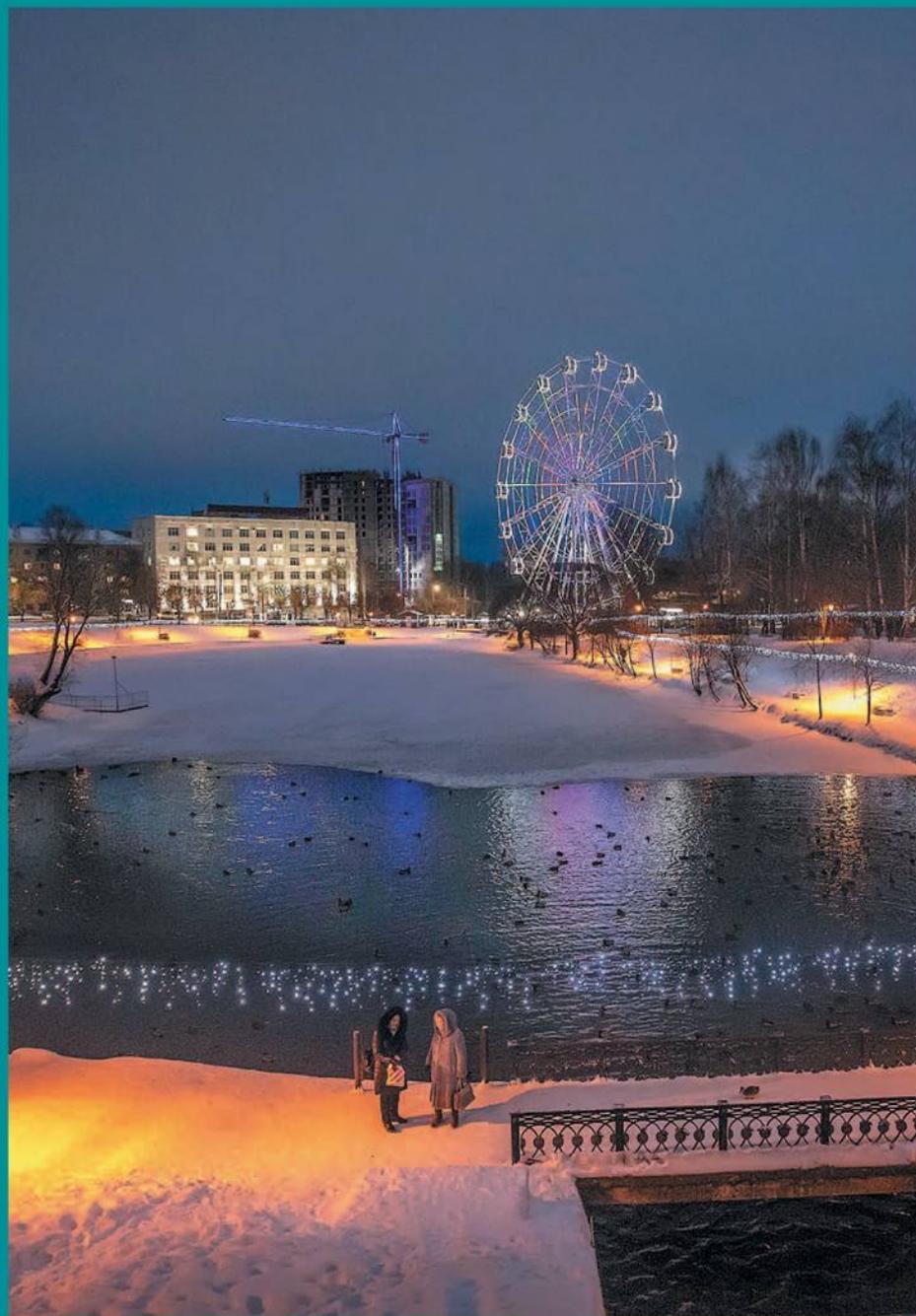


Рис. 3. Значения индекса мутности на карте-схеме Омутнинского водохранилища, построенной по результатам дешифрирования (07.09.2019)
Fig. 3. Turbidity index values on the map-diagram of the Omutninsk reservoir, based on the results of interpretation (07.09.2019)

Индекс 82027, 48482



ISSN 1995-4301



9 771995 430004