



Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

9/2018 (9)

**ПРИКЛАДНАЯ
ЭКОЛОГИЯ СЕВЕРА**

выпуск 6

Апатиты
2018

9/2018 (9)

издается с декабря 2010 г.

УДК 574 (470.21)
ISSN 2307-5252

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9

Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра

Главный редактор:
чл.-корр. РАН, проф. С. В. Кривовичев

Заместитель главного редактора:
д. т. н. В. А. Маслобоев

Редакционный совет:
академик Г. Г. Матишов,
академик Н. Н. Мельников,
чл. - корр. В. К. Жиров,
чл. - корр. А. Н. Николаев,
д. э. н. Ф. Д. Ларичкин
д. т. н. В. А. Путилов,
д. ф. - м. н. Е. Д. Терещенко,
к. г.-м. н. А. Н. Виноградов (отв. секретарь)

Редколлегия серии
«Прикладная экология Севера»:

д. т. н. Д. В. Макаров (отв. редактор),
к. б. н. Е. А. Боровичев
(зам. отв. редактора),

к. б. н. Д. Б. Денисов,
к. б. н. И. В. Зенкова,
к. с.-х. н. Л. Г. Исаева
к. э. н. Е. М. Ключникова
к. б. н. М. В. Корнейкова
к. б. н. Н. Е. Королева
к. б. н. П. М. Терентьев

к. б. н. И. В. Зенкова (отв. ред. выпуска)

ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ СЕВЕРА

выпуск 6

к Году экологии и Особо охраняемых
территорий в России и 30-летию основания
Института проблем промышленной экологии
Севера ФИЦ КНЦ РАН



2017
ГОД ЭКОЛОГИИ
В РОССИИ



Научное издание
Технический редактор: В. Ю. Жиганов
Подписано к печати 09.11.2018. Формат бумаги 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 17. Заказ № 32. Тираж 500 экз.
Издательство ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14
www.naukaprint.ru

184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул.
Ферсмана, 14, Кольский научный центр РАН
Тел.: (81555) 79393, 79380, факс: (81555) 76425
E-mail: admin@admksk.apatity.ru, <http://www.ksc.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....		Стр. 5
Исаева Л. Г., Сухарева Т. А., Боровичев Е. А., Урбанавичюс Г. П., Химич Ю. Р., Зенкова И. В., Артемкина Н. А., Горбачева Т. Т., Ершов В. В., Мамонтов Ю. С., Иванова Е. А.	Изучение и охрана наземных экосистем Мурманской области	6
Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Зубова Е. М., Королева И. М., Косова А. Л., Черепанов А. А.	Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии	34
Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Мязин В. А., Редькина В. В., Фокина Н. В., Шалыгина Р. Р., Чапоргина А. А., Янишевская Е. С.	Микробиологические исследования в Мурманской области	87
Макаров Д. В., Маслобоев В. А., Кошкина Л. Б., Сулименко Л. П., Светлов А. В., Мингалева Т. А., Денисова Ю. Л., Красавцева Е. А.	Исследования по обоснованию снижения экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса: основные результаты и перспективы научного направления	104
Мазухина С. И.	Моделирование в решении экологических проблем	160
Боровичев Е. А., Денисов Д. Б., Корнейкова М. В., Исаева Л. Г., Разумовская А. В., Химич Ю. Р., Мелехин А. В., Косова А. Л.	Гербарий ИППЭС КНЦ РАН	179
Ключникова Е. М.	Международное сотрудничество как фактор актуализации экологических исследований	186

9/2018 (9)

UDC582.232
ISSN 2307-5252

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9

Russian Academy of Sciences

transactions

Kola Science Centre

Editor-in-Chief: S. V. Krivovichev,
Corr. Member of the RAS, Prof.

Deputy Editor-in-Chief:
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering)

Editorial Council:

G. G. Matishov, Acad. of RAS,
N. N. Melnikov, Acad. of RAS,
V. K. Zhiron, Cor. Member of RAS,
A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS,
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),
V. A. Putilov, Dr. Sc. (Engineering),
E. D. Tereshchenko, Dr. Sc.
(Physics and Mathematics),
A. N. Vinogradov, PhD.
(Geology and Mineralogy) –
Executive Secretary

**Applied Ecology
of the North**
Series 6

Editorial Board of

«Applied Ecology of the North» Series:
D. V. Makarov, Dr. Sc. (Engineering),
(Editor-in-Chief),
E. A. Borovichev, PhD (Biology),
(Deputy Editor-in-Chief)
D. B. Denisov, PhD (Biology),
L. G. Isaeva, PhD (Biology),
E. M. Klyuchnikova, PhD (Economics),
M. V. Korneykova, PhD (Biology),
N. E. Koroleva, PhD (Biology),
P. M. Terentjev, PhD (Biology),
I. V. Zenkova, PhD (Biology),

I. V. Zenkova, PhD (Biology),
(Editor-in-Chief of the issue)

to the Year of Ecology
and Protected Areas in Russia
and the 30th Anniversary of INEP KSC RAS



14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia
Tel. (81555) 79380. Fax: (81555) 76425
E-mail: admin@admksk.apatity.ru, <http://www.ksc.ru>

© Institute of North Industrial Ecology Problems
of the Kola Science Centre of RAS, 2018
© Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, 2018

CONTENTS

	Page
Foreword	5
Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Borovichev E. A., Urbanavichus G. P., Khimich Yu. R., Zenkova I. V., Artemkina N. A., Gorbacheva T. T., Ershov V. V., Mamontov Y. S., Ivanova E. A.	The study and conservation of terrestrial ecosystems in the Murmansk Region 6
Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Zubova E. M., Koroleva I. M., Kosova A. L., Cherepanov A. A.	Complex investigations of Fennoscandian freshwater ecosystems 34
Korneykova M. V., Evdokimova G. A., Myazin V. A., Redkina V. A., Fokina N. V., Shalygina R. R., Chaporgina A. A., Yanishevskaya E. S.	Microbiological researches in the Murmansk Region ... 87
Makarov D. V., Masloboev V. A., Koshkina L. B., Sulimenko L. P., Svetlov A. V., Mingaleva T. A., Baurova B. L., Krasavtseva E. A.	Substantiation of research on the reduction of ecological danger from mining waste: main results and perspectives of investigations 104
Mazukhina S. I.	Applying modeling for a solving of ecological problems 160
Borovichev E. A., Denisov D. B., Korneykova M. V., Isaeva L. G., Razumovskaya A. V., Khimich Yu. R., Melechin A. V., Kosova A. L.	Herbarium of INEP KSC RAS 179
Klyuchnikova E. M.	International cooperation as a factor of actualization of environmental studies 186

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий выпуск «Трудов Кольского научного центра РАН» серии «Прикладная экология Севера» был задуман еще в 2017 и приурочен к двум знаменательным событиям, связанным с деятельностью Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН: Году экологии и особо охраняемых природных территорий, объявленному в России в 2017 году, и 30-летию основания Института, которое будет отмечаться в 2019 году. По различным причинам подготовка выпуска журнала затянулась, но главная задача осталась прежней — представить результаты по основным направлениям деятельности Института, разработка которых обеспечила ему славу ведущего учреждения в области развития научных основ экологической оптимизации природопользования и сохранения природных сред и биологического разнообразия в промышленно развитых регионах Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Авторы статей подвели некоторые итоги научной и научно-организационной работы, в основном, за период 2012–2017 гг. Это своеобразный «взгляд изнутри», позволяющий оценить, чем жил, в каких направлениях работал в последние годы и с каким научным заданием подошел Институт к своему 30-летию юбилею.

Первые три статьи, подготовленные коллективами крупнейших лабораторий Института – наземных экосистем, водных экосистем и экологии микроорганизмов, обобщают многолетние исследования по мониторингу наземных и водных экосистем Мурманской области, изучению биоразнообразия на видовом, ценоотическом и молекулярном уровнях. В статье Д. В. Макарова с соавторами приводится обзор работ Лаборатории экологии промышленного производства, направленных на снижение экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса. Математическое моделирование как инструмент изучения состояния экосистем Мурманской области и прогнозирования их изменения под влиянием различных природных и антропогенных факторов — это традиционное направление деятельности Института, обзор работ по этой тематике содержит статья С. И. Мазухиной. Большая часть междисциплинарных исследований была выполнена Институтом совместно с зарубежными коллегами, и результаты международного сотрудничества представила в отдельной статье Е. М. Ключникова. В коллективной статье «Гербарий ИППЭС КНЦ РАН» дана характеристика этого важного инструмента изучения биоразнообразия региона и документальной основы всех флористических и микологических исследований Института.

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.6-33
УДК 502.5 (470.21)

**Л. Г. Исаева, Т. А. Сухарева, Е. А. Боровичев, Г. П. Урбанавичюс,
Ю. Р. Химич, И. В. Зенкова, Н. А. Артемкина, Т. Т. Горбачева,
В. В. Ершов, Ю. С. Мамонтов, Е. А. Иванова**

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН
Лаборатория наземных экосистем*

ИЗУЧЕНИЕ И ОХРАНА НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация

Дан краткий обзор основных результатов исследований Лаборатории наземных экосистем ИППЭС КНЦ РАН за период 2012–2017 гг. Рассмотрены приоритетные направления изучения пространственно-временных закономерностей функционирования северотаежных лесов в природных и антропогенно нарушенных местообитаниях. На основе биогеохимических показателей выявлены особенности дигрессионных и восстановительных сукцессий в зависимости от меняющихся условий среды и диагностированы ответные реакции экосистем на антропогенные изменения. Важным прикладным направлением исследований является реабилитация нарушенных территорий и анализ применяемых подходов к восстановлению растительности в зоне воздействия медно-никелевых предприятий региона. За минувшие пять лет проанализированы все доступные данные и подготовлены аннотированные списки печеночников, лишайников и афиллофороидных грибов заповедников Лапландского и «Пасвик». Обобщены результаты по локальной фауне беспозвоночных животных Хибинского горного массива, значительно уточнены экология и распространение видов беспозвоночных животных и криптогамных организмов в Мурманской области, обнаружены виды, новые для России и региона. Важный блок работ лаборатории – разработка научных основ охраны и мониторинга редких и исчезающих видов, выделение биологически ценных и редких растительных сообществ, участие в подготовке и ведении Красной книги Мурманской области. Основой проводимых исследований являются регулярно пополняемые база данных по химическому составу различных компонентов естественной и трансформированной среды, и Гербарий INEP.

Ключевые слова:

северотаежные леса, биогеохимия, биоразнообразие, природные и техногенные факторы, мониторинг, ремедиация, ООПТ, редкие виды, Мурманская область.

**L. G. Isaeva, T. A. Sukhareva, E. A. Borovichev, G. P. Urbanavichus,
Yu. R. Khimich, I. V. Zenkova, N. A. Artemkina, T. T. Gorbacheva,
V. V. Ershov, Y. S. Mamontov, E. A. Ivanova**

THE STUDY AND CONSERVATION OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS IN THE MURMANSK REGION

Abstract

Main results of the Laboratory of Terrestrial Ecosystems of the Institute of Industrial Ecology Problems in the North of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences in the period 2012–2016 are reviewed. The priority research areas of the spatio-temporal regularities of the northern taiga, functioning under natural conditions and in the changed by man environment are analysed. Digression and remedial successions, which depend on the changing environment, were studied on the basis of biogeochemical data. The ecosystem responses to the anthropogenic changes of the environment were diagnosed as well. The significant applied approach in the research is considered to be the environmental remediation of the disturbed areas. Applied methods of restoration of

the vegetation in the area of cooper-nickel enterprises were elaborated. All available data have been analyzed retrospectively and the annotated lists of liverworts, lichens and apylophoroid fungi of the State Natural Reserves, such as Laplandskiy and «Pasvik», were prepared. The data on the invertebrate's fauna of the Khibiny Mountain were summarized. The ecology and distribution of the invertebrate species and cryptogamous organisms in the Murmansk region were precized significantly. The new species, both for Russia and for the Murmansk region, were revealed. The important focus area of the research is as following: the elaboration of scientific basis for protection and monitoring of rare and threatened species; searching of biologically valuable and rare plant communities; the preparation and management of the Red Book in the Murmansk region. This research is based on regularly amended data base on the chemical composition of various natural and transformed environmental characteristics, as well as the main Herbarium INEP.

Keywords:

boreal forest, biogeochemistry, biodiversity, natural and anthropogenic factors, monitoring, remediation, protected areas, rare species, Murmansk region.

Введение

Лаборатория наземных экосистем была создана одновременно с Институтом проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН в 1989 году. Первым её руководителем до 2003 года был профессор, доктор биологических наук В. В. Никонов, создатель уникальной в России сети биогеохимического мониторинга в зонах влияния медно-никелевых комбинатов. Эта сеть функционирует более 25 лет и позволяет сформировать корректное представление о современных экосистемных процессах, оценить критические нагрузки на экосистемы Севера, предложить критерии их диагностики и методологию мониторинга, обосновать подходы к восстановлению нарушенных территорий (Никонов, Лукина, 1994; Лукина, Никонов, 1996, 1998). После перехода профессора В. В. Никонова в Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН, Москва) Лабораторией наземных экосистем руководит к.с.-х.н. Л. Г. Исаева, которая сохраняет преемственность и приоритеты научных направлений лаборатории.

Основными задачами лаборатории являются глубокое и всестороннее исследование биоразнообразия, структуры и функций наземных экосистем Севера, разработка методологии и методов их мониторинга, рационального использования, сохранения и восстановления в условиях изменяющихся природных и антропогенных факторов.

В настоящее время в лаборатории сформировались и функционируют две научные группы: по изучению биогеохимических особенностей наземных экосистем Севера и исследованию биоразнообразия, что позволяет комплексно оценить современное состояние и степень устойчивости (уязвимости) наземных экосистем Субарктики к воздействию природных и антропогенных факторов.

Биогеохимические исследования.

Мониторинг состояния наземных экосистем Севера

В течение многих лет сотрудниками лаборатории изучаются состояние, динамика развития и степень антропогенной модификации наземных экосистем Европейского Севера. Мониторинговая сеть площадок используется как исследовательский и обучающий полигон, и представлена в настоящее время девятью площадками комплексного биогеохимического мониторинга. Площадки

оборудованы по европейским стандартам (осадкоприемники, гравитационные лизиметры, опадоуловители, автоматические регистраторы температуры — термохроны) и расположены по градиенту загрязнения от предприятий цветной металлургии. В рамках мониторинга регулярно проводится отбор проб атмосферных выпадений, почвенных и стволовых вод, древесного опада, периодически — почвы, листьев/хвои древесных растений, доминирующих растений напочвенного покрова, оценивается состояние крон деревьев, напочвенного покрова и почвенной фауны, по мере необходимости — съедобных грибов и ягод дикорастущих растений.

Детальные лабораторные исследования проб выполняются в Центре коллективного пользования физико-химических методов анализа природных сред и биологических объектов ИППЭС КНЦ РАН, оснащенном современным оборудованием, соответствующим международному уровню: атомно-абсорбционными спектрофотометрами, ионными хроматографами. Результаты ежегодных сравнительных международных химико-аналитических испытаний (интеркалибровок) свидетельствуют о высокой точности проводимых анализов.

С 1989 года ведется база данных по химическому составу атмосферных выпадений, почвенных и стволовых вод, почв, ассимиляционных органов растений, лишайников, грибов, ягод, по массе и фракционному составу древесного опада в условиях природных и антропогенных факторов формирования лесных экосистем. Накопленный массив многолетних данных является основой для анализа пространственно-временной динамики лесных естественных и нарушенных экосистем.

Результаты, полученные на стационарах, позволили сформировать представление о дигрессионных сукцессиях в бореальных лесах в условиях воздушного промышленного загрязнения кислотообразующими веществами и соединениями тяжелых металлов, а также сделать выводы о современных тенденциях функционирования северотаежных лесов с учетом их пространственной гетерогенности и временной изменчивости, уточнить средообразующую роль древесных растений в лесных биогеоценозах и предложить параметры для ранней диагностики состояния бореальных лесов.

При оценке критических нагрузок на почвы бореальной зоны было показано значение пространственной и временной изменчивости состава атмосферных выпадений и почвенных вод (Ершов и др., 2018; Лукина и др., 2018). Выявлены закономерности трансформации атмосферных выпадений, почвенных вод и почв в различных типах леса на северном пределе распространения, в том числе, под действием доминирующих видов растений северотаежных лесов (Ершов, Исаева, 2014, 2015; Ершов, Лукина, 2014; Ершов и др., 2018).

В результате многолетнего анализа пространственной (внутри- и межбиогеоценотической) вариабельности состава снеговых вод в сосновых и еловых лесах, подверженных воздушному промышленному загрязнению выбросами крупнейшего в Северной Европе медно-никелевого комбината «Североникель», было показано, что основными факторами динамики состава снеговых вод в лесах региона являются древесные растения-средообразователи и воздушное промышленное загрязнение. Установлено, что подкروновые снеговые воды еловых и сосновых лесов богаче соединениями элементов, чем межкروновые, что обусловлено вымыванием и выщелачиванием этих соединений из крон. Подкروновые воды еловых лесов отличаются высокими концентрациями

соединений элементов вследствие сорбирующей способности крон ели. Наиболее отчетливые тенденции многолетней динамики состава снега, связанные со снижением выбросов, выявлены в фоновых условиях и дефолирующих лесах, но не вблизи источников выбросов (Ershov et al., 2016).

Оценена эффективность функционирования техногенного геохимического барьера грунта техногенной пустоши. Отмечен безбарьерный тип миграции элементов в период после снеготаяния (Горбачева, 2012). Выполнен ретроспективный анализ (до и после снижения техногенной нагрузки) форм нахождения элементов в составе растворимой части талых снеговых вод на разных стадиях техногенной дигрессии северотаежных лесов и выполнена идентификация источника пылевых осадений в снеговом покрове на мониторинговых площадках вблизи комбината «Североникель» (Горбачева и др., 2015). Проведено сопоставление форм нахождения элементов в талых водах по состоянию на 1995 и 2013 гг. Снижение аэротехногенной нагрузки после модернизации производства способствовало повышению окислительно-восстановительного потенциала в техногенных редколесьях (локальной зоне влияния медно-никелевого комбината) вследствие снижения выбросов сернистого ангидрида, являющегося активным восстановителем. На стадии дефолирующих лесов (28–100 км от источника выбросов) отмечено перераспределение форм Al и тяжелых металлов в сторону снижения доли простых катионных форм, признающихся наиболее токсичными для биоты.

Исследованы закономерности образования плодородия почв березовых лесов разных типов, формирующих предел распространения древесной растительности в Мурманской области (Орлова и др., 2014). Были обследованы почвы, принадлежащие к разным типам и подтипам: глееземы торфянистые, подбуры иллювиально-гумусовые, подзолы иллювиально-гумусовые и иллювиально-железистые. Выявлено, что уровень плодородия почв березовых лесов на широтных и высотных пределах их распространения обусловлен комбинированным влиянием состава почвообразующих пород и растительности. Выполнен анализ биогенных механизмов формирования плодородия почв в экотоне лес-тундра, исследованы взаимосвязи между растительным и почвенным покровом (Orlova et al., 2013). Отмечено, что при продвижении границы древесных растений (ель, сосна, береза) и кустарничков произойдет существенное изменение параметров цикла углерода, значительное обогащение почв элементами питания и снижение кислотности органогенных горизонтов.

Дана оценка пространственного (внутрибиогеоценотического) и временного (сезонная и многолетняя динамика) варьирования массы и фракционного состава древесного опада сосняков кустарничково-лишайниковых в фоновых условиях и в ходе техногенной дигрессии (Иванова, Лукина, 2017). В лесах, подверженных воздушному промышленному загрязнению, за последние 20 лет, несмотря на снижение объемов выбросов, выявлены тренды увеличения массы опада, главным образом, за счет таких фракций, как хвоя и кора. Это объясняется как ослаблением деревьев, вызванным влиянием загрязнения в годы, предшествующие снижению выбросов, так и продолжающимся влиянием выбросов в период наблюдений, а также увеличением возраста и фитомассы древостоев. Наблюдается значительное увеличение соотношения между массой опадающей хвои и её живой массой в техногенных редколесьях по сравнению с фоновыми условиями (0.6 и 0.1, соответственно).

При изучении пространственно-временной динамики элементного состава ассимилирующих органов доминирующих видов растений и лишайников северотаежных лесов в процессе техногенной дигрессии (Сухарева, 2013а,б) выявлены аномально высокие концентрации тяжёлых металлов в листьях растений и талломах лишайников, в том числе, на приграничной территории России, Норвегии и Финляндии (Сухарева, 2012; Исаева, Сухарева, 2012, 2013).

На основе многолетних данных (1991–2011 гг.) показано снижение концентрации тяжелых металлов и серы в хвое ели и сосны при различном уровне воздушного загрязнения. Уменьшение концентрации поллютантов в хвое не оказало положительного влияния на параметры минерального питания: сохраняется недостаточная обеспеченность растений элементами питания, некоторые элементы становятся дефицитными. Наиболее значительные нарушения минерального питания наблюдаются у ели (Сухарева, 2013а, 2014а, Сухарева, Лукина, 2014). Впервые изучена круглогодичная динамика химического состава хвои ели сибирской в лесах на северном пределе распространения. Выявлены взаимосвязи между изменением массы хвои, температурой воздуха и почвы (Сухарева, 2014б).

Обнаружена высокая аккумулирующая способность лишайников в условиях атмосферного загрязнения, в том числе на значительном расстоянии от источников выбросов. Высокие уровни накопления тяжёлых металлов отмечены в лишайниках на территориях заповедников Лапландского и «Пасвик». Установлены парцеллярные различия в элементном составе лишайников, произрастающих в подкروновых и межкروновых пространствах (Сухарева, 2016). Выполнена оценка накопления тяжёлых металлов в съедобных грибах и ягодах дикорастущих растений в районе воздействия медно-никелевых предприятий региона (Исаева, Сухарева, 2012, 2013).

Исследуются процессы трансформации фенилпропаноидов в растительных тканях. Фенольные соединения – важная составная часть растительных организмов и один из основных механизмов взаимодействия растений со средой. Они принимают активное участие в окислительно-восстановительных процессах и процессах фотосинтеза, являются необходимым компонентом дыхательной пероксидазной системы растений, взаимодействуют с белками, регулируют процессы роста и репродукции. Фенольные соединения ответственны за формирование иммунитета у растений, их изучение представляет интерес для выяснения физиолого-биохимических процессов адаптации растений к условиям произрастания в субарктическом климате. Показана зависимость содержания фенольных соединений в растениях и опаде от различных факторов окружающей среды (Артемкина, Горбачева, 2009; Артемкина 2010а,б; Артемкина и др., 2016).

Важным и перспективным направлением исследований лаборатории, которое развивается в тесном сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими организациями (ЦЭПЛ РАН, МГУ им. Ломоносова), является экометабономика, связанная с исследованием метаболитов и метаболомов (компонентов экосистем) и их динамики в зависимости от изменений окружающей среды. Экстракты из лесных почв и почвенные воды представляют собой информативную матрицу для характеристики метаболома лесных экосистем в целом, поскольку они отражают многочисленные взаимодействия абиотических и биотических компонентов (Лукина и др., 2016), в частности, влияние древесных пород на свойства почв в северотаежных лесах

Мурманской области (Орлова и др., 2016). В современной научной литературе господствуют представления о том, что ель способствует подкислению почв. В процессе исследования нами выявлено, что возраст, размеры деревьев, строение их крон, регулирующее количество проникающих осадков и, следовательно, интенсивность выноса соединений элементов из почв, определяют различия в показателях кислотности и почвенного плодородия. При этом существенное значение имеет высокий уровень накопления кальция в стареющей хвое у елей старшего возраста. Требуется дальнейшее развитие исследований по влиянию ели на почвы в динамике, по мере роста и развития деревьев, в естественных условиях лесной среды.

Особый интерес при проведении мониторинговых работ имеет изучение влияния температурного фактора на состояние и динамику наземных экосистем. Опубликованы данные по летней динамике температуры в органогенных горизонтах почв горных систем заповедника «Пасвик» и его окрестностей на северо-западе Мурманской области. С помощью автономных термохронов получены сравнительные данные по динамике температуры в подстилках биоценозов таёжного и лесотундрового горно-растительных поясов на склонах южной (гора Каскама), юго-восточной (гора Калкупя) и северо-западной (гора Кораблекк) экспозиции. Установлено достоверное влияние факторов высотной поясности и экспозиции склонов на различие температурного режима горных подстилок (Зенкова, 2013).

С 2013 года проводится исследование внутрисуточной и сезонной динамики температуры подстилок в экосистемах Хибинского массива с учетом факторов высотной поясности растительного покрова, экспозиции горных склонов и расположения гор в пределах массива (Штабровская, Зенкова, 2017а,б).

Восстановление нарушенных территорий

Прикладным направлением деятельности лаборатории является развитие методологии реабилитации нарушенных территорий в условиях воздушного промышленного загрязнения. Изучение природных закономерностей механизмов восстановительной сукцессии представляет самостоятельный интерес и служит ключом к созданию эффективных технологий восстановления нарушенных территорий.

С 1997 года сотрудниками лаборатории проводятся целенаправленные эксперименты по разработке научно-обоснованных подходов к восстановлению почвенно-растительного покрова в зонах воздействия медно-никелевых комбинатов и созданию полигонов на основе экологического (сукцессионного) и инвестиционного (сельскохозяйственного) подходов. Первые полевые эксперименты под руководством профессора В. В. Никонова начинались с небольших участков (2x2 м²), в дальнейшем исследования охватили нарушенные воздушным загрязнением техногенные пустоши и дефолирующие леса. В полевых экспериментах изучали эффективность различных сельскохозяйственных и экологических подходов, подбирали нормы внесения удобрений и мелиорантов, нормы посева и видовой состав многолетних трав и травосмесей, оценивали состояние и устойчивость древесно-кустарничковых пород. На основе проведенных экспериментов были предложены методы стабилизации состояния дефолирующих лесов и пути восстановительных

сукцессий в техногенных редколесьях и пустошах на основе оптимизации питательного режима экосистем (Лукина и др., 2005).

С 2003–2004 гг. Мончегорским и Печенгским лесохозяйственными предприятиями начата реализация разработанных сотрудниками лаборатории подходов и рекомендаций по восстановлению растительности на техногенных пустошах в импактных зонах комбинатов «Североникель» и «Печенганикель». В настоящее время, в условиях продолжающегося воздушного промышленного загрязнения, работы по восстановлению растительности с применением различных подходов выполнены в окрестностях города Мончегорск на площади более 80 га, в окрестностях поселков Никель и Заполярный — более 15 га. Результаты этих работ позволили подтвердить, что регулирование почвенных условий является ключевым моментом в решении проблемы восстановления растительного покрова на территориях, подверженных действию выбросов медно-никелевых комбинатов на Кольском полуострове. Создание растительного покрова из многолетних трав-интродуцентов в относительно сжатые сроки и оптимизация питательного режима почв способствуют колонизации местными видами (мхи, иван-чай, хвощи, листовые породы др.), которые успешно вытесняют интродуцированные растения (Исаева и др., 2011; Исаева, Белова, 2012; Исаева, Лукина, 2013).

Для Мурманской области и других промышленных районов Крайнего Севера совместно со специалистами ПАБСИ КНЦ РАН и ИХТРЭМС КНЦ РАН разработана инновационная технология ускоренной фиторекультивации территорий, поврежденных выбросами медно-никелевых производств (Иванова и др., 2014; Слуковская и др., 2014). Технология основана на использовании ковровой дернины из многолетних злаков в сочетании с вермикулитовым почвозаменителем, серпентинитовыми и карбонатитовыми отходами местной горнодобывающей промышленности. Подстилающий слой снижает концентрацию тяжелых металлов и повышает содержание питательных элементов (Ca, Mg, P) в грунте, способствует ускорению роста растений и восстановительной сукцессии на техногенных пустошах.

В настоящее время продолжаются работы по развитию методологии восстановления нарушенных территорий и проводятся регулярные наблюдения за динамикой восстановительных сукцессий.

Изучение и мониторинг биоразнообразия наземных экосистем

В последние годы сотрудники Лаборатории наземных экосистем ИППЭС КНЦ РАН активно включились в изучение биоразнообразия наземной биоты — грибов, лишайников, мохообразных, высших сосудистых растений и беспозвоночных животных.

Грибы. Царство Грибы насчитывает в Мурманской области по экспертным оценкам около 1500 видов (Красная книга ..., 2014). Пристальное внимание в лаборатории уделяется изучению афиллофороидных грибов. Обработка литературных данных и гербарных образцов позволила подготовить в 2011 году каталог афиллофороидных грибов, включающий 321 вид (Исаева, Химич, 2011). Исследованиями последних лет их список увеличен до 375 видов (Химич и др., 2016, 2017; Bolshakov et al., 2016). Информация о двух десятках видов, ранее неизвестных в регионе, пока не опубликована.

Одним из основных направлений в изучении микобиоты является обследование особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Мурманской области. В ходе анализа разнообразия афиллофороидных грибов на ООПТ, входящих в Зеленый пояс Фенноскандии, в том числе в заповедниках «Пасвик», Лапландский, заказниках «Кутса» и «Лапландский лес», выявлены редкие и индикаторные виды (Крутов и др., 2012).

С 2012 года детально исследуется территория заповедника «Пасвик». Долгое время единственными источниками о грибах заповедника были «Летописи природы», где упоминалось не более десятка широко распространенных видов афиллофороидных грибов. По результатам исследований был составлен первый список афиллофороидных грибов заповедника «Пасвик», насчитывающий 83 вида (Руокалайнен и др., 2011; Крутов и др., 2012). Некоторые итоги изучения афиллофороидных грибов «Пасвика» были подведены в 2015 году (Химич и др., 2015), их список увеличился до 124 видов, из которых 18 впервые выявлены в Мурманской области и многие из них в настоящее время известны только в этой части региона.

Определенные успехи достигнуты в познании биоты афиллофороидных грибов крупнейшего и старейшего в Мурманской области Лапландского заповедника. Недавно были обобщены архивные и собственные сведения по афиллофороидным грибам (Исаева и др., 2012; Крутов и др., 2012) и составлен предварительный список из 116 видов. В результате дальнейших микологических исследований в список добавлены 68 видов, причем 11 видов впервые выявлены в Мурманской области: *Ceratellopsis sagittiformis*¹, *Craterellus lutescens*, *Gloeocystidiellum convolvens*, *Hydnum umbilicatum*, *Macrotyphula tremula*, *Piloderma byssinum*, *Pseudotomentella vepallidospora*, *Ramaria neoformosa*, *R. roellinii*, *Scytinostromella heterogenea* *Typhula subvariabilis* (Isaeva et al., 2015; Химич и др., 2017). Детально изучена группа напочвенных грибов, насчитывающая 73 вида (Химич и др., 2017).

Меньшее внимание за последние годы было уделено Кандалакшскому заповеднику. В результате полевых исследований 2002 и 2013 гг. в заповедной части полуострова Турий выявлено 56 видов афиллофороидных грибов, из них 42 являются новыми для заповедника, 6 видов впервые отмечены в Мурманской области: *Byssocorticium atrovirens*, *Botryobasidium candicans*, *Hapalopilus ochraceolateritius*, *Hydnum rufescens*, *Hyphodontia borealis*, *Sistotrema muscicola* (Исаева, Химич, 2015).

Микологическими исследованиями были охвачены и малонарушенные леса Хибинского горного массива, включая ельники в межгорной долине реки Кунийок. Выявлено 32 вида афиллофороидных грибов, 4 из которых являются новыми для микобиоты области – *Skeletocutis papyracea*, *Trechispora stellulata*, *Tubulicrinis borealis*, *T. effugiens*. В 2012 году в результате обширной промышленной рубки в долине уничтожено известное местообитание очень редкого в Мурманской области вида *Antrodia crassa* (Химич, Исаева, 2014).

¹Названия видов грибов приведены по Index Fungorum (2017); печеночников — в основном по мировому списку печеночников (Söderström et al., 2016) с некоторыми поправками (Konstantinova, Vakalin et al., 2009); мхов по — Ignatov et al. (2006); сосудистых растений — по С. К. Черепанову (1995) с некоторыми изменениями.

Образцы грибов, собранные на территории Мурманской области, все чаще привлекаются для таксономических исследований. В частности, показана целесообразность выделения видов *Ceriporiopsis consobrina* и *Fibuloporia cremea* в новый род *Niemelaea* Zmitr., Ezhov et Khimich, предложены новые номенклатурные комбинации: *Niemelaea consobrina* (Bres.) Zmitr., Ezhov et Khimich, *Niemelaea consobrina* var. *balaenae* (Niemelä) Zmitr., Ezhov et Khimich, *Niemelaea cremea* (Parmasto) Zmitr., Ezhov et Khimich (Zmitrovich et al., 2015). Некоторые образцы вовлечены в обработку видов родства *Phanerochaete sordida* (Volobuev et al., 2015).

Исследование биоты дереворазрушающих грибов на антропогенно трансформированных территориях находится на начальном этапе. Изучен видовой состав афиллофороидных грибов на древесных интродуцентах зеленых насаждений города Апатиты; выявлено 18 видов, из них три стали новыми для Мурманской области — *Ceriporia reticulata*, *Corticium roseum*, *Peniophora limitata* (Химич, 2013). Ряд таксонов сейчас известен только на урбанизированных территориях — *Antodiella leucoxantha*, *Hericium cirrhatum*, *Sistotrema confluens*, *Xanthoporus syringae*, *Ganoderma applanatum* (Химич и др., 2016).

Попутно регистрируются грибы других групп. В Мончегорске в искусственных насаждениях осины, как в чистых древостоях, так и с примесью ивы и березы, обнаружен аскомицет сморчковая шапочка — *Verpa bohemica* (Берлина, Химич, 2014). В ельнике зеленомошном на территории государственного природного комплексного заказника «Варзугский» выявлено единственное местонахождение редкого в России вид *Sarcosoma globosum* (Химич и др., 2013), включенного в федеральную Красную книгу (2008).

Лишайники. Сотрудниками лаборатории планомерно изучается биоразнообразие лишайников и близких нелихенизированных грибов в малонарушенных и антропогенно нарушенных северотаежных лесах Мурманской области. Так, было прослежено изменение разнообразия эпифитных лишайников в еловых лесах под влиянием аэротехногенных выбросов Мончегорского медно-никелевого комбината (Урбанавичюс, 2012). Первые виды, выявленные в еловых лесах по градиенту основного переноса промышленных выбросов, — *Japewia subaurifera* и *J. tornoënsis* – обнаружены на удалении 28 км от источника загрязнения и являются наиболее токситолерантными в условиях северо-таежных лесов за Полярным кругом. Наиболее чувствительные (токсикофобные) виды лишайников, признаваемые индикаторами естественных малонарушенных или коренных лесов в странах Северной и Центральной Европы, такие как *Alectoria sarmentosa*, *Bryoria capillaris*, *Bryoria fuscescens*, *Bryoria implexa*, *Bryoria nadvornikiana*, *Platismatia glauca*, *Usnea diplotypus*, *Usnea lapponica*, отмечены на «Мончегорском градиенте» только на условно фоновых пробных площадях, удаленных от источника выбросов почти на 200 км (Урбанавичюс, 2012).

Существенные успехи достигнуты в изучении лишайников на заповедных территориях региона. В результате многолетнего обследования Лапландского заповедника к концу 2012 года было выявлено 613 видов лишайников и систематически близких нелихенизированных лихенофильных и сапротрофных грибов, традиционно учитываемых в лихенофлористических сводках (Урбанавичюс и др., 2013). В последующие годы в результате обработки части ранее неразобранных коллекций были обнаружены еще около 30 видов

лишайников, новых для лишенофлоры заповедника (Мелехин, 2013, 2015; Урбанавичюс, 2013; Melechins, 2016 и др.). В настоящее время лишенофлора Лапландского заповедника насчитывает 633 вида, что составляет около 50 % от общего числа известных видов лишенофлоры области. Несмотря на значительный объем проделанной работы, видовой состав лишайников и лишенофильных грибов заповедника выявлен далеко не полно. Оценочно, исходя из разнообразия местообитаний этой территории и соотношения числа известных видов макролишайников и микролишайников, лишенофлора изучена на 70–75 % от потенциально возможного видового состава. Имеющиеся данные показывают, что в сети существующих региональных ООПТ Лапландский заповедник играет важную роль в сохранении биологического разнообразия лишайников области (Поликарпова и др., 2016).

Целенаправленные исследования лишенофлоры заповедника «Пасвик», проводимые с 2012 года, позволили существенно увеличить число известных видов. К началу инвентаризационных работ на территории заповедника было зафиксировано 277 видов и 5 подвидов (Фадеева и др., 2011). Последовавшие исследования ежегодно увеличивали число известных таксонов примерно на 45–55 видов, в итоге к началу 2017 года богатство лишенофлоры заповедника «Пасвик» исчислялось 530 видами (Урбанавичюс, Фадеева, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017; Фадеева и др., 2013; Урбанавичюс, 2014; Урбанавичюс и др., 2014; Urbanavichus, 2015, 2016). В настоящее время по числу известных таксонов лишенофлора заповедника занимает 6-е место среди более чем 100 заповедников России, при этом общая площадь «Пасвика» в 15–60 раз меньше площади заповедников с более богатой лишенофлорой (Урбанавичюс, Фадеева, 2017). По отношению к лишенофлоре всей Мурманской области роль заповедника «Пасвик» (с учетом размеров его территории) наиболее высока по сравнению с другими ООПТ — здесь представлено около 40 % видов лишенофлоры области при занимаемой им площади менее чем 0,1 % от площади региона. На территории заповедника зафиксировано 16 видов лишайников, подлежащих полной охране (или 20 % охраняемых в регионе) и 11 видов, нуждающихся в особом внимании к их состоянию в природной среде Мурманской области (Красная книга ..., 2014). Восемь «краснокнижных» видов — *Arthonia vinosa*, *Chaenotheca chlorella*, *Collema curtisporum*, *Dermatocarpon rivulorum*, *Melanelixia subargentifera*, *Phaeophyscia orbicularis*, *Stereocaulon capitellatum*, *Toninia verrucarioides* не представлены в других заповедниках области (Урбанавичюс, 2017). Таким образом, полученные данные по составу лишайников заповедника «Пасвик», представляющего собой условные эталонные экосистемы, являются основой как для последующего мониторинга состояния биоразнообразия лишенофлоры охраняемой территории, так и при отслеживании восстановления разнообразия этой группы в зоне так называемой «лишайниковой пустыни» (полного отсутствия лишайников на территориях с интенсивным аэротехногенным загрязнением).

Мохообразные. Подведены итоги изучения флоры печеночников Лапландского заповедника, которая насчитывает 173 вида (Borovichev, 2014). Гепатикофлора заповедника составляет 63 % от всей флоры печеночников Европейской части России, 66,5 % от флоры печеночников Северо-Запада России (Konstantinova, Bakalin et al., 2009) и 88 % от флоры Мурманской области, при этом площадь заповедника занимает менее 2 % от площади региона. Детально

изучены гепатикофлоры четырех крупных горных массивов заповедника: Чуна-тундра (132 вида), Сальные тундры (139), Монче-тундра (124) и Нявка-тундра (108).

В 2012-2016 гг. детально изучена флора печеночников заповедника «Пасвик». На основе собственных данных, гербарных и литературных материалов подготовлен и опубликован предварительный список печеночников заповедника, включающий 103 вида (5 подвидов и 2 разновидности) (Borovichev, Boychuk, 2016). Два вида — *Calycularia laxa* и *Oleolophozia perssonii* в Мурманской области обнаружены во второй раз, что существенно расширяет представления об их распространении. Учитывая небольшую площадь и скудное разнообразие природных условий заповедника, его территорию можно считать высоко репрезентативной для сохранения и устойчивого развития редких видов печеночников. Здесь выявлено 4 вида из числа включенных в Красную книгу Европейских мохообразных (Red Data Book., 1995), — *Barbilophozia rubescens*, *Haplomitrium hookeri*, *Lophozia ascendens* и *Nardia japonica*; 3 вида из числа занесенных в Красную книгу РФ (2008), — *Haplomitrium hookeri*, *Nardia breidleri* и *Oleolophozia perssonii* и 12 видов из числа внесенных в Красную книгу Мурманской области (2014).

В результате бриофлористических исследований территории Турьего мыса (Кандалакшский заповедник) в 2013 году был составлен список из 56 видов печеночников и 120 видов мхов. Впервые для полуострова приводятся 20 видов печеночников и 65 видов мхов, при этом 4 вида печеночников и 5 видов мхов — новые для заповедника, а виды *Didymodon acutus*, *Kiaeria* cf. *riparia*, *Plagiomnium affine* и *Scapania glaucocephala* впервые указываются для Мурманской области (Мамонтов, 2014). Выявлены новые местонахождения трёх видов печеночников — *Anastrophyllum sphenoloboides*, *Crossocalyx hellerianus*, *Riccardia palmata* и четырёх видов мхов — *Herzogiella turfacea*, *Meesia longiseta*, *Tortula cernua*, *Tortula mucronifolia*, включенных в Красную книгу Мурманской области (2014).

Выполнена обработка полевых материалов по видовому составу печеночников в поясах берёзовых криволесий и лишайниковых тундр в долине реки Териберка в Ловозерском районе Мурманской области (горы Вувдасвейв, Эневейв 1 и Эневейв 2, пойма р. Териберка). В районе исследования выявлено 67 видов, из которых 3 включены в Красную книгу Мурманской области (2014): *Kurzia pauciflora*, *Prasanthus suecicus*, *Protolophozia elongata*. Обработка переданных из МГУ полевых материалов по видовому составу печеночников на бугристых болотах в устье реки Поной Ловозерского района позволила выявить 27 видов печеночников, в том числе «краснокнижный» вид *Cephalozia elachista*.

Совместно с Н. Е. Королевой (ПАБСИ КНЦ РАН) ведутся работы по изучению роли криптогамных организмов в растительном покрове Мурманской области и европейского сектора Арктики и Субарктики. Неполные и неточные представления о ценотическом статусе редких видов печеночников (как и других криптогамных организмов) затрудняют разработку мер охраны, единственно эффективным способом которой для криптогамных видов является охрана их местообитаний. Обобщены данные о растительных сообществах с преобладанием талломного печеночника *Sauteria alpina* в арктических тундрах Шпицбергена и Скандинавских горах. Показано различие в составе сосудистых растений, видовом богатстве и синтаксономической принадлежности сообществ при сходстве в условиях местообитаний и во внешнем облике (Koroleva, Borovichev, 2014).

Исследования парциальных флор печеночников в лесных сообществах Лапландского заповедника показали, что наименее богатой по сравнению с разнообразием печеночников еловых лесов является объединенная парциальная флора (ОПФ) сосновых лесов. Кроме того, группы ОПФ включили виды, нехарактерные для местообитаний этих парциальных флор, например, проникающие в лесные парциальные флоры по «каменистым коридорам». Было показано, что сложно интерпретировать группы, полученные в результате кластеризации парциальных флор печеночников, поскольку они включают несколько экологически близких типов сообществ (групп ассоциаций или ассоциаций, а в лесных сообществах — типов леса) доминантной классификации либо одну (реже несколько) ассоциацию эколого-флористической классификации. Условия лесного биотопа имеют определяющее значение для распространения некоторых редких видов печеночников (Боровичев, Королева, 2013; Borovichev, Koroleva, 2015).

Сосудистые растения. Важным направлением флористических работ является изучение редких и охраняемых растений в различных частях региона. Так, в Печенгском районе выявлены новые местонахождения «краснокнижных» видов сосудистых растений *Cassiope tetragona*, *Potentilla kuznetzowii*, *Draba fladnizensis*, *D. lactea*, *Tanacetum bipinnatum*. Находки двух последних видов существенно расширяют представление об их распространении как в области, так и в Фенноскандии в целом (Костина, Боровичев, 2014). В результате мониторинговых работ в районах устьев рек Поной и Русинга, а также мыса Орловский впервые в восточной части Кольского полуострова выявлены местонахождения охраняемых видов сосудистых растений: *Asplenium trichomanes*, *A. viride*, *Botrychium lanceolatum*, *B. multifidum*, *Cryptogramma crispa*, *Isoetes echinospora*, *Ranunculus sulphureus*, *Rhynchospora alba*, *Saxifraga hieracifolia*, *S. tenuis* и *Woodsia glabella* (Костина и др., 2015), впервые в Мурманской области обнаружена *Dupontia pelligera* (Кожин и др., 2016). Три редких в регионе вида впервые отмечены в заповеднике «Пасвик» – *Asplenium viride*, *Draba alpina*, *D. nivalis* (Кравченко и др., 2016).

Большое внимание в последнее время уделяется изучению чужеродных (адвентивных) видов и расширению распространения местных видов — апофитов, для которых новые условия среды оказались благоприятными. В частности, интродуцированные растения из озеленительного ассортимента хорошо осваиваются, в том числе в условиях городов. Выявлены новые адвентивные виды, ранее неизвестные для флоры сосудистых растений: *Daucus carota*, *Veronica gentianoides* (Боровичев и др., 2013), *Hordeum jubatum*, *Onobrychis viciifolia*, *Senecio erucifolius* (Кожин и др., 2014), *Dianthus campestris*, *Rosa xmajorugosa*, *Trifolium ambiguum*, *Pimpinella major*, *Phacelia tanacetifolia*, *Campanula rapunculoides*, *Scorzonera humilis* (Кожин и др., 2016), *Capsicum annuum*, *Coriandrum sativum*, *Carex contigua* и *Phaseolus vulgaris* (Кравченко и др., 2017).

Растительный покров Мурманской области. За последние годы получены важные результаты по растительности и ее состоянию в ряде труднодоступных пунктов региона. Проведено геоботаническое и лесопатологическое обследование территории на левом берегу реки Умба в среднем ее течении (Королева и др., 2017). Показано, что в исследованном районе на бедных моренных и аллювиальных песках распространены сосновые леса (сосняк брусничный лишайниково-зеленомошный ассоциации *Cladonio arbusculae-Pinetum sylvestris*

((Cajander 1921) K.-Lund 1967), зональный тип — ельник кустарничковый сфагново-зеленомошный асс. *Empetro-Piceetum obovatae* (Sambuk 1921) Morozova 2008, интразональные типы растительности — приручьевые ивняки (асс. *Vaccinio uliginosi-Betuletum pubescentis* Libbert 1933) и верховые болотные комплексы, с отдельными соснами, включающие олиготрофные осоково-пушицевые топи (асс. *Calliergo sarmentosi-Eriophoretum angustifolii* Nordhagen 1928) и кустарничково-сфагновые кочковатые участки (асс. *Empetro-Sphagnetum fusci* ((Du Rietz (1921) 1926) Dierssen 1982). На обследованной территории выявлено 3 вида из Красной книги Мурманской области. Из них лишайник *Bryoria fremontii* внесен в Красную книгу РФ (2008) в категории «редкий вид» (3б) и в региональную Красную книгу (2014) с особым статусом, как вид, не требующий специальных мер охраны в регионе; печеночник *Scapania umbrosa* — с категорией «редкий вид» (3); из сосудистых растений отмечена *Chamaedaphne calyculata* — вид, нуждающийся в особом внимании к состоянию в природной среде Мурманской области.

Совместно с сотрудниками Лапландского заповедника проводятся исследования по восстановлению растительности на вырубках 50-х гг. XX века. В настоящее время детальное описание растительности выполнено на 18 стационарах, где проведен сплошной пересчет деревьев и подростов по породам, высоте, диаметру, определены категории жизненного состояния, выполнены геоботанические описания. Древесный полог в основном представлен сосной. Напочвенный покров почти полностью восстановился, на некоторых стационарах отмечается «потравленность» ягеля диким северным оленем. Показано, что после сплошной рубки деревьев (как при летней, так и при зимней заготовке леса) спустя 55–60 лет основной лесообразующей породой является сосна; здесь сформировался сосняк кустарничково-лишайниковый. Проведение выборочных рубок крупномерных или единичных деревьев не внесло значительных изменений в состав растительности, в 2014–2016 гг. на этих стационарах зафиксирован тип леса, который был здесь до рубки (Исаева, Берлина, 2016).

Беспозвоночные животные. Объектом зоологических исследований являются беспозвоночные, принадлежащие к двум размерно-функциональным группам почвенной фауны — микрофауне и мезофауне (в трактовке М. С. Гилярова, 1949). Исследования охватывают разные уровни организации — от характеристики индивидуальной изменчивости морфологических признаков беспозвоночных и параметров их популяций до особенностей структурно-функциональной организации и динамики почвенных зооценозов в градиентах природных и антропогенных факторов.

Исследования акцентированы на ключевых группах сапрофагов (дождевые черви, моллюски, коллемболы, панцирные клещи), трофически связанных с микроорганизмами и участвующих совместно с ними в процессах биотрансформации органического вещества в почве, а также на хищных беспозвоночных, доминирующих в экосистемах Крайнего Севера по численности и/или разнообразию видов (паукообразные, многоножки, жесткокрылые) и регулирующих обилие беспозвоночных нижних трофических уровней по принципу трофического каскада. Ведется работа по составлению региональных аннотированных списков видов этих таксономических групп. К видовой идентификации привлекаются зоологи — специалисты по соответствующим группам в фаунах высокоширотных регионов. Обобщающие

работы по разнообразию видов и их распространению в пределах Мурманской области опубликованы для панцирных клещей (Зенкова и др., 2011а; Зенкова, Мелехина, 2014), дождевых червей (Zenkova, Rapoport, 2014) и многоножек (Zenkova, 2016).

Популяционные исследования проводятся на примере тех видов беспозвоночных, которые принадлежат к маловидовым таксонам. Это один из пяти известных для региона видов многоножек — *Lithobius (Monotarsobius) curtipes* (Myriapoda, Chilopoda, Lithobiidae) и два из шести видов дождевых червей — *Dendrobaena octaedra* и *Lumbricus rubellus* (Annelida, Oligochaeta, Lumbricidae).

С 2016 года в рамках выполнения проекта «Трофические связи и функциональная роль хищной многоножки *Lithobius curtipes* на северной периферии ареала: онтогенетический, сезонный и географический аспекты» исследуется трофический статус и комплекс трофических связей *L. curtipes* в качестве возможных факторов, определяющих самое северное среди многоножек распространение этого вида в Палеарктике и его успешное существование в субарктических районах. Определение источников и путей поступления энергии на трофический уровень, к которому принадлежит *L. curtipes*, анализ изменчивости ширины трофической ниши этого вида в сезонном, возрастном и географическом аспектах проводится методом изотопного анализа. Содержание тяжелых изотопов углерода ^{13}C и азота ^{15}N в тканях многоножек и их потенциальных пищевых объектов определяется на оборудовании ЦКП и в сотрудничестве с Институтом проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова (ИПЭЭ РАН, Москва).

При отсутствии в почвах Мурманской области беспозвоночных-сапрофагов из числа активных минерализаторов растительного опада (мокриц и двупарноногих многоножек-диплопод) ключевой группой средо- и почвообразователей являются дождевые черви семейства Lumbricidae. В результате многолетних исследований почв равнинных и горных экосистем региональная фауна люмбрицид расширена до шести видов, среди них евроазиатский вид *Eisenia nordenskioldi*, распространение которого ограничено 34–40° в. д. (Всеволодова-Перель, 1997; Tiunov et al., 2006), является новым для Мурманской области и найден только в почвах Хибинского щелочного массива. Выявленные виды червей принадлежат к трем из четырех известных жизненных форм: подстилочной (*Dendrobaena octaedra*, *Dendrodrilus rubidus tenuis*), подстильно-почвенной (*Lumbricus rubellus*, *Eisenia fetida*, *Eisenia nordenskioldi*) и почвенной (*Aporrectodea caliginosa caliginosa*); черви норной жизненной формы в «карликовых» почвах Мурманской области не выявлены. Результаты изотопного анализа тканей доминирующих видов червей *D. octaedra*, *L. rubellus* и *A. c. caliginosa* показали, что при совместном обитании в пяти см слое лесной подстилки эти виды используют разные источники углерода и занимают разные трофические позиции.

С 2008 года объектом детальных исследований является почвенная фауна горных систем Мурманской области. К настоящему времени почвенно-зоологические работы выполнены: в Хибинском массиве — в более чем 40 биоценозах в пределах таежного, лесотундрового, тундрового и гольцового горно-растительных поясов в градиенте высот 250–1100 метров над уровнем моря на склонах 10-ти гор; на территории заповедника «Пасвик» и его окрестностей — в 9 биоценозах на высоте 155–300 м над ур. м. на склонах трех гор. Получен

значительный объем новой информации о современном состоянии локальных фаун двух заполярных горных систем: выявлены общие закономерности организации и высотно-поясного распределения беспозвоночных, а также различия, связанные с особенностями географического расположения, климата, геологического происхождения, физико-химических и минералогических характеристик горных почв (Зенкова и др., 2011б,в; Зенкова, Колесникова, 2015; Zenkova, Rapoport, 2014; Zenkova, 2016). Идентифицировано более 430 видов почвенной и герпетобионтной фауны. Фауна горных почв заповедника «Пасвик» отличается пониженным числом видов во всех проанализированных таксонах при отсутствии или малочисленности крупных кальцефильных педобионтов — дождевых червей, моллюсков, многоножек, что связано как с расположением гор заповедника на границе северной тайги и лесотундры, так и с загрязнением почв атмосферными выбросами металлургического комбината «Печенганикель».

В горах заповедника «Пасвик» впервые для его территории выявлены 43 вида пауков, 23 вида стафилинид, по 2 вида жужелиц и шелкунов; еще 13 видов пауков и жесткокрылых из горных почв заповедника и более трех десятков видов беспозвоночных из почв Хибин впервые указываются нами для Мурманской области. Примечательно, что эти видовые списки не пересекаются, т.е. по результатам исследования двух горных систем новыми для этого заполярного региона являются не менее 40 видов беспозвоночных. Таким образом, подтверждена положенная в основу исследований идея о том, что горные экосистемы обогащают фауну беспозвоночных животных заполярных регионов.

На склонах хибинских гор Поачвумчорр и Юмечорр найдена редкая в Мурманской области крупная нелетающая жужелица блестящая *Carabus nitens*. Наши исследования подтвердили сохранение этого европейского вида с дизъюнктивным у северных границ ареала в горных экосистемах Мурманской области. На основании этих находок вид включен во второе издание региональной Красной книги (2014).

Охрана природы и создание особо охраняемых природных территорий

Со времени образования ИППЭС КНЦ РАН важными направлениями деятельности Лаборатории наземных экосистем были и остаются следующие: а) обоснование формирования системы особо охраняемых территорий в контексте территориальной организации Баренцева Евро-Арктического региона; б) разработка научных основ охраны и мониторинга редких и исчезающих видов, биологически ценных и редких растительных сообществ, участие в подготовке Красных книг.

Особо охраняемые природные территории (ООПТ)

В 2000-х гг. природоохранные и научные организации Мурманской области вместе со специалистами из Архангельской, Вологодской, Ленинградской областей, Республики Карелия и г. Санкт-Петербурга работали над масштабным проектом «ГЭП-анализ на Северо-Западе России», который был направлен на оценку репрезентативности системы ООПТ в этом регионе (Сохранение..., 2011). Была проанализирована защищенность основных типов ландшафтов, экосистем с высокой природоохранной ценностью и редких биологических видов из Красной книги России на ООПТ регионов-участников проекта. В 2011 г. по итогам этого проекта, при активном участии сотрудников Института, подготовлена

«Концепция функционирования и развития сети особо охраняемых природных территорий Мурманской области до 2018 года и на перспективу до 2038 года», утвержденная постановлением Правительства Мурманской области № 128-ПП от 24 марта 2011 г. «Концепция» и «Схема развития и размещения ООПТ» региона определяют основные направления развития сети ООПТ, приоритет и сроки их создания.

В 2014 году совместно с Кольским геолого-информационным центром и ПАБСИ КНЦ РАН выполнена оценка репрезентативности существующей сети ООПТ и показано, что действующая Концепция развития ООПТ соответствует задачам охраны природы в Мурманской области и нуждается лишь в некоторой актуализации. В частности, в 2011–2016 гг. не были созданы большинство из запланированных к организации ООПТ, в том числе национальный парк «Хибины». Тем не менее, за этот период организованы 8 ООПТ регионального значения: 4 памятника природы («Хям-ручей», «Ключевое болото Турьего полуострова», «Междуречье реки Сальница», «Ирин-гора»), 2 заказника («Лапландский лес», «Кайта») и 2 природных парка («Полуострова Рыбачий и Средний» и «Кораблекк»).

Начиная с 2016 года, Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области проводит плановые работы по оценке эффективности функционирования сети региональных ООПТ, в которых активно участвует и ИППЭС КНЦ РАН. В 2016 году совместно с Институтом леса Карельского научного центра РАН выполнена оценка эффективности функционирования региональных памятников природы Печенгского района — «Кедр сибирский», «Водопад на реке Шуонийок», «Биогруппа елей (биогруппа елей на границе ареала)» и «Геолого-геофизический полигон «Шуони-Куэтс». Два последних объекта было рекомендовано лишить статуса ООПТ из-за утери природоохранной ценности номинальных объектов охраны. В 2017 г. совместно с ПАБСИ КНЦ РАН, Центром гуманитарных проблем Баренц-региона и Геологическим институтом ФИЦ КНЦ РАН обследованы памятники природы Апатитского, Кировского и Мончегорского районов: «Ущелье Айкуайвенчорр», «Криптограммовое ущелье», «Эвтрофное болото южного Прихибинья», «Ёкостровское кинтище», «Юкспорлакк», «Кедры и лиственницы возле станции Хибины», «Базальтоидные лавы у Риж-Губы», «Ледниковый валун». Последний памятник был рекомендован к ликвидации по причине физической утраты объекта.

Выявлены потенциальные участки Изумрудной сети территорий особого (общеевропейского) природоохранного значения (ТОПЗ) в Мурманской области (Белкина и др., 2011-2013). Составлены очерки о 25 ТОПЗ, включающие сведения о редких и нуждающихся в охране видах печеночников (территория ПАБСИ КНЦ РАН, проектируемый национальный парк «Хибины», Мочажинное болото г. Апатиты, Кандалакшский заповедник, Верховья реки Толванд, Губа Воронья, Колвицкий заказник, заказник «Кутса», Лишайники верховий реки Воронья, Малонарушенные леса Мошинского лесничества Ковдозерского лесхоза, Известковый завод, Надбородники долины озера Щучьего, Кайта, Лавна-тундра, Скалы Териберки, Лумбовский залив, Мыс Орлов, реки Русинга, Качковка, Панские тундры, Лапландский заповедник, Симбозерский заказник, заповедник «Пасвик», Хям-ручей). Каждый очерк содержит информацию о местоположении территорий, наличии ценных местообитаний европейского значения, обитании видов европейского значения и видов, занесённых в Красную книгу РФ и Мурманской области.

Красная книга Мурманской области

Красная книга — это основной документ, в котором содержится информация, необходимая для разработки и осуществления мероприятий по сохранению и восстановлению редких, находящихся под угрозой исчезновения и нуждающихся в особой охране видов животных, растений и грибов. Красная книга позволяет осуществлять административно-правовое регулирование сохранения редких видов и их местообитаний.

Первая официальная Красная книга Мурманской области (ККМО) вышла в свет в 2003 году. В конце 2014 года было опубликовано её второе издание. Необходимо подчеркнуть, что работы по изучению редких и исчезающих видов растений и животных не прекращались ни на один год, несмотря на недостаточное финансирование со стороны правительства Мурманской области или полное отсутствие такового. Эти исследования проводились научными и общественными организациями в рамках тем НИР, работ по грантам, хозяйственным договорам и т.д. (Боровичев и др., 2014).

Над вторым изданием Красной книги Мурманской области трудились ученые из ИППЭС КНЦ РАН, ПАБСИ КНЦ РАН, ММБИ КНЦ РАН, Институт лесов и биологии КарНЦ РАН, заповедников региона — Кандалакшского, Лапландского, «Пасвик», Института экологии УрО РАН, Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН (БИН РАН), Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, Ботанического музея университета г. Хельсинки, Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ) и других организаций. Авторами были обобщены все имеющиеся литературные данные, материалы гербариев ПАБСИ КНЦ РАН (КРАВГ), ИППЭС КНЦ РАН (INER), Кандалакшского (KAND) и Лапландского (LAPL) заповедников, БИН им. В. Л. Комарова РАН (LE), МГУ им. М. В. Ломоносова (MW), Ботанического музея университета г. Хельсинки, Финляндия (H). В результате проведенной работы представления о распространении видов и угрозе их существования в Мурманской области заметно изменились. Выявлены новые для региона виды, некоторые обнаруженные популяции находятся на значительном удалении от основного видового ареала. Всего в Перечень второго издания ККМО включено 480 биологических видов: грибов — 18, лишайников — 84, водорослей — 3, мохообразных — 120, сосудистых растений — 189, животных — 66 видов.

Заключение

Представленные в статье результаты, полученные коллективом Лаборатории наземных экосистем в период 2012–2017 гг., являются продолжением теоретических и экспериментальных исследований структурно-функциональной организации северотаежных лесов, которые проводятся в Институте на протяжении почти 30 лет.

Основными направлениями научных исследований Лаборатории наземных экосистем в последние годы являются изучение биогеохимических особенностей наземных экосистем Севера, развитие методологии и методов их мониторинга и восстановления нарушенных земель, комплексное изучение биоразнообразия криптогамных организмов и беспозвоночных животных, охрана природы.

Изучение биогеохимических циклов углерода и элементов питания в северотаежных лесах на постоянной сети мониторинговых станций и на трансектах, заложенных в экотонах лес-лесотундра-тундра (в высотной поясности

и в широтной зональности), способствуют развитию представлений о природных особенностях функционирования наземных экосистем и их трансформации в условиях воздушного промышленного загрязнения. Полученные данные позволяют значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих в наземных экосистемах под воздействием природных и техногенных факторов, выявлении основных направлений и механизмов дигрессионных и восстановительных сукцессий в зависимости от меняющихся условий среды, определении ответных реакций экосистем на антропогенные изменения, их устойчивости и способности к восстановлению.

За последние годы изучены и подготовлены аннотированные списки лишайников, афиллофороидных грибов и печеночников заповедников Лапландского и «Пасвик», обобщены данные по локальным фаунам беспозвоночных животных Хибинского горного массива и возвышенностей заповедника «Пасвик». Значительно уточнены экология и распространение видов беспозвоночных животных и криптогамных организмов в Мурманской области, обнаружены виды, новые для России и региона. Разрабатываются научные основы охраны и мониторинга редких и исчезающих видов, обосновывается выделение биологически ценных и редких растительных сообществ. Важной вехой стала подготовка второго издания Красной книги Мурманской области (2014), в работе над которой приняли участие все сотрудники лаборатории, занимающиеся изучением биоразнообразия региона. Фактической основой проводимых исследований является регулярно пополняемая база данных по химическому составу различных компонентов естественной и трансформированной среды и основной Гербарий INEP.

В лаборатории сложился активный и трудоспособный коллектив, решающий комплексные научные задачи: есть специалисты, передающие накопленные знания, и молодые ученые – кандидаты наук, аспиранты и магистранты, перенимающие этот опыт. Это является как залогом дальнейшей устойчивой работы в рамках традиционных направлений лаборатории, так и возможностью для развития новых приоритетных научных направлений.

Формирование представлений о современном состоянии и функционировании наземных экосистем Мурманской области, их абиотических компонентов и биоты было бы невозможным без ежегодных сезонных экспедиций сотрудников лаборатории (как в малоисследованные районы Мурманской области, так и на площадки многолетнего интенсивного мониторинга фоновых и антропогенно трансформированных наземных экосистем), а также без слаженной работы аналитической группы лаборатории, выполняющий большой объем химических анализов.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам Лаборатории наземных экосистем Е. А. Беловой, Г. Н. Андреевой, С. В. Сверчковой, О. И. Денисовой, Е. О. Киселевой, Р. П. Чапоргиной, С. В. Жуковой за многолетнюю и квалифицированную экспериментальную работу, сбор, обработку и систематизацию научно-технической информации, наполнение и ведение базы данных по мониторингу наземных экосистем.

Основные результаты, представленные в статье, получены в рамках выполнения государственного задания по теме «Пространственно-временные

закономерности функционирования северотаежных лесов: природные и техногенные аспекты (2013–2017 гг.). Исследования были поддержаны грантами научных организаций: Программой фундаментальных исследований Президиума РАН: «Водная миграция органического углерода, элементов питания и поллютантов в северотаежных лесах» (2012–2014); «Влияние качества опада на разложение органического вещества в лесах на северном пределе распространения» (2012–2014); «Современное состояние и биоразнообразие почвенной фауны заполярных горных экосистем в условиях антропогенного воздействия и изменения климата (на примере Кольского Севера)» (2012–2014); «Лигнин и фенольные соединения в почвах и растениях северотаежных лесов» (2015–2017); грантами РФФИ: № 12-04-01538-а «Своеобразие биоты горных почв и ее вклад в биологическое разнообразие заполярных регионов (на примере Хибинского горного массива)» (2012–2014); № 14-34-50179 мол_нр «Афиллофороидные грибы биогеографической провинции Печенгская Лапландия Мурманской области» (2014); № 15-29-02396 офи_м «Лихенофлора Северного Кавказа: таксономическая структура, разнообразие, специфика, систематика отдельных таксонов и вклад в разнообразие лишайников России» (2015–2017); № 16-04-01878-а «Трофические связи и функциональная роль хищной многоножки *Monotarsobius curtipes* (Myriapoda, Chilopoda, Lithobiidae) на северной периферии ареала: онтогенетический, сезонный и географический аспекты» (2016–2018); № 17-44-510841 р_а «Влияние антропогенной трансформации горных арктических экосистем на разнообразие и распространение редких и биологически ценных видов растений, лишайников, грибов и животных» (2017–2019); № 17-304-50028 мол-нр «Исследование сообществ почвенных нематод под влиянием интродукции древесных пород в условиях Кольской Субарктики» (2017).

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Динамика и восстановление биоразнообразия и функций наземных экосистем Субарктики в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов», № гос. рег.: АААА-А18-118021490070-5.

Литература

Артемкина Н. А., Горбачева Т. Т. Содержание фенолов в коре ели на разных стадиях техногенной сукцессии биогеоценозов Кольского полуострова // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 111–116.

Артемкина Н. А. Содержание фенольных соединений в *Vaccinium vitis-idaea* L. сосновых лесов Кольского полуострова // Химия растительного сырья. 2010а. № 3. С. 153–160.

Артемкина Н. А. Содержание фенольных соединений и элементный состав в *Vaccinium vitis-idaea* (Ericaceae) в еловых лесах Кольского полуострова в условиях техногенного загрязнения // Растительные ресурсы. 2010б. Т. 46. № 2. С. 86–98.

Артемкина Н. А., Орлова М. А., Лукина Н. В. Химический состав хвои *Juniperus sibirica* (Cupressaceae) в экотоне лес-тундра, Хибинские горы // Экология. 2016. № 4. С. 243–250.

Белкина О. А., Блинова И. В., Боровичёв Е. А., Демахина Т. В., Кобяков К. Н., Кольцов Д. Б., Конорева Л. А., Константинова Н. А., Королёва Н. Е., Костина В. А., Лихачёв А. Ю., Мелехин А. В., Петров В. Н., Плец М. Ю., Урбанавичене И. Н.,

Урбанавичюс Г. П. Территории особого природоохранного значения Мурманской области // Изумрудная книга Российской Федерации. Территории особого природоохранного значения Европейской России. Предложения по выявлению. Ч. 1. М.: Институт географии РАН, 2011–2013. С. 41–51.

Берлина Н. Г., Химич Ю. Р. Сморчковая шапочка – *Verpa bohemica* (Krombh.) Schroet. (Ascomycota) в Мурманской области // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2014. Т. 119. Вып. 2. С. 84–85.

Боровичев Е. А., Белкина О. А., Давыдов Д. А., Исаева Л. Г., Кожин М. Н., Константинова Н. А., Костина В. А., Урбанавичюс Г. П. Растения, грибы и лишайники во втором издании Красной книги Мурманской области // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы V-ой Всероссийской научной конференции с международным участием. В 3 ч. Апатиты: КНЦ РАН. 2014. Ч. 1. С. 86–91.

Боровичев Е. А., Королева Н. Е. Эколого-ценотический анализ печеночников в лесах Лапландского заповедника (Мурманская область) // Лесоведение. 2013. № 3. С. 54–63.

Боровичев Е. А., Костина В. А., Петровский М. Н. Материалы к флоре сосудистых растений Мурманской области // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2013. Т. 118. Вып. 6. С. 57–58.

Всеволодова-Перель Т. С. Дождевые черви фауны России: кадастр и определитель. М.: Наука. 1997. 102 с.

Гиляров М. С. Особенности почвы как среды обитания и ее значение в эволюции насекомых. М.: АН СССР, 1949. 279 с.

Горбачева Т. Т. Техногенная пустошь вблизи медно-никелевого производства как геохимический барьер (лизиметрические исследования). // Цветные металлы. 2012. № 2. С. 36–39.

Горбачева Т. Т., Мазухина С. И., Иванов С. В., Черепанова Т. А. Реконструкция состава талых вод в зоне влияния выбросов медно-никелевого комбината методом физико-химического моделирования (на примере Мурманской области) // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. № 23. С. 339–345.

Ершов В. В., Исаева Л. Г. Многолетняя динамика тяжелых металлов (Co, Cd, Pb, Cr) в атмосферных выпадениях в хвойных лесах Кольского Севера // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Книга 2. Киров: Веси. 2014. С. 81–85.

Ершов В. В., Исаева Л. Г. Многолетняя динамика меди и никеля в подстилочных водах в хвойных лесах Кольского севера // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем. Материалы XIII Всеросс. насл.-практ. конф. с международ. участием. Киров, 2015. С. 167–170.

Ершов В. В., Исаева Л. Г., Иванова Е. А. Кислотонейтрализующая способность почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенной нагрузки медно-никелевым комбинатом // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2018. Вып. 15. С. 453–455.

Ершов В. В., Лукина Н. В. Многолетняя динамика и пространственное варьирование состава дождевых выпадений в хвойных лесах Кольского полуострова // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения:

Материалы V-ой Всероссийской научной конференции с международным участием: в 3 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. Ч. 1. С. 127–129.

Зенкова И. В. Летняя динамика температуры в горных почвах заповедника «Пасвик» // Вестник МГТУ. Серия Естественные науки. 2013. Том 16. № 4. С. 715–725.

Зенкова И. В., Зайцев А. С., Залиш Л. В., Лисковая А. А. Почвообитающие панцирные клещи (Acarina, Oribatei) таежной и тундровой зон Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Биогеография. 2011а. Вып. 11. № 1. С. 54–67.

Зенкова И. В., Пожарская В. В., Похилько А. А. Высотное распределение почвенной фауны Хибин // Почвоведение. 2011б. № 9. С. 1083–1093.

Зенкова И. В., Пожарская В. В., Филиппов Б. Ю., Колесникова А. А., Середюк С. Д. Высотная поясность и комплексы жесткокрылых в почвах Хибинского горного массива // Труды КарНЦ РАН. Сер. Биогеография. 2011в. Вып. 12. № 2. С. 107–118.

Зенкова И. В., Колесникова А. А. Стафилинидофауна заповедника «Пасвик» (Мурманская область) // Труды Тигирекского заповедника. 2015. № 7. С. 239–246.

Зенкова И. В., Мелехина Е. Н. Панцирные клещи (Acari: Oribatida) Хибинского горного массива // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы V-ой Всероссийской научной конференции с международным участием. В 3 ч. Апатиты: КНЦ РАН. 2014. Ч. 1. С. 135–140.

Иванова Е. А., Лукина Н. В. Пространственно-временное варьирование массы и фракционного состава древесного опада сосняков кустарничково-лишайниковых в условиях аэротехногенного загрязнения // Лесоведение. 2017. № 5. С. 47–58.

Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Слуковская М. В., Кременецкая И. П., Иноземцева Е. С. Инновационные технологии рекультивации нарушенных земель // Экология производства. 2014. № 2. С. 58–68.

Исаева Л. Г., Белова Е. А. Восстановление растительности на техногенных пустошах вблизи комбината // Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки «Никель» и «Заполярный»): влияние на наземные экосистемы / Общ. ред. О. А. Хлебосоловой. Рязань: «Голос губернии». 2012. С. 71–78.

Исаева Л. Г., Берлина Н. Г. Мониторинг восстановления растительности на вырубках // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием. Апатиты: КНЦ РАН. 2016. С. 88–92.

Исаева Л. Г., Берлина Н. Г., Химич Ю. Р. Афиллофороидные грибы Лапландского заповедника // Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника. М.: Перо. 2012. Вып. VI. С. 215–239.

Исаева Л. Г., Лукина Н. В. Восстановление растительности на техногенных пустошах вокруг комбинатов медно-никелевого производства // Инновации и технологии в лесном хозяйстве. Материалы III Международной научно-практической конференции. СПб., 2013. С. 102–105.

Исаева Л. Г., Лукина Н. В., Горбачева Т. Т., Белова Е. А. Ремедиация нарушенных территорий в зоне влияния медно-никелевого производства // Цветные металлы. 2011. № 11. С. 66–70.

Исаева Л. Г., Сухарева Т. А. Состояние наземных экосистем в зоне влияния комбината «Печенганикель» // Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки «Никель» и «Заполярный»): влияние на наземные экосистемы / Ред. О. А. Хлебосолова. Рязань: Голос губернии. 2012. С. 25–35.

Исаева Л. Г., Сухарева Т. А. Элементный состав дикорастущих кустарничков в зоне воздействия комбината «Североникель»: данные многолетнего мониторинга // Цветные металлы. 2013. № 10. С. 86–92.

Исаева Л. Г., Химич Ю. Р. Каталог афиллофороидных грибов Мурманской области. Апатиты: КНЦ РАН. 2011. 68 с.

Исаева Л. Г., Химич Ю. Р. К биоте афиллофороидных грибов полуострова Турий (Кандалакшский заповедник, Мурманская область) // Новости систематики низших растений. 2015. Т. 49. С. 142–150.

Кожин М. Н., Костина В. А., Боровичев Е. А., Корякин А. С., Берлина Н. Г., Демахина Т. В. Находки адвентивных видов сосудистых растений Мурманской области // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2014. Т. 119. Вып. 6. С. 57–58.

Кожин М. Н., Боровичев Е. А., Костина В. А., Петровский М. Н., Сенников А. Н. Новые и редкие виды сосудистых растений Мурманской области. Сообщение 2 // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2016. Т. 121. Вып. 6. С. 65–69.

Королева Н. Е., Исаева Л. Г., Боровичев Е. А. Состав, структура и состояние лесов в среднем течении р. Умба (Мурманская область) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 3(9). С. 119–129.

Костина В. А., Боровичев Е. А. Находки редких видов сосудистых растений в Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2014. № 2. С. 155–159.

Костина В. А., Боровичев Е. А., Белкина О. А., Копеина Е. И. Находки редких видов сосудистых растений в Мурманской области. II // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2015. № 6. С. 71–78.

Кравченко А. В., Кожин М. Н., Боровичев Е. А., Костина В. А. Новые данные о распространении охраняемых сосудистых растений в Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2016. № 3. С. 84–89.

Кравченко А. В., Боровичев Е. А., Химич Ю. Р., Фадеева М. А., Кутенков С. А., Костина В. А. Значимые находки растений, лишайников и грибов на территории Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 7. С. 34–50.

Красная книга Мурманской области. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Отв. ред.: Н. А. Константинова, А. С. Корякин, О. А. Макарова, В. В. Бианки. Кемерово: «Азия-принт». 2014. 584 с.

Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Товарищество научных изданий КМК. 2008. 855 с.

Крутов В. И., Руоколайнен А. В., Коткова В. М., Исаева Л. Г., Химич Ю. Р. Афиллофоровые грибы ООПТ Российской части Зеленого пояса Фенноскандии // Грибные сообщества в лесных экосистемах. / Под ред. В. И. Крутова, В. Г. Стороженко. Том 3. М.-Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2012. С. 117–146.

Лукина Н. В., Ершов В. В., Горбачева Т. Т., Орлова М. А., Исаева Л. Г., Тебенькова Д. Н. Оценка состава почвенных вод северотаежных хвойных лесов фоновых территорий индустриально развитого региона. // Почвоведение, 2018. № 3. С. 284–296.

Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2-х ч. Апатиты: КНЦ РАН. 1996. Ч. 1. 213 с. Ч. 2. 192 с.

Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: КНЦ РАН. 1998. 316 с.

Лукина Н. В., Орлова М. А., Перминова И. В., Хусаинова В. С., Воробьева Д. Н., Артемкина Н. А. Метаболомика лесных экосистем: проблемы и перспективы. // Лесоведение. 2016. № 6. С. 457–465.

Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаёжных лесах / Отв. ред. А. С. Исаев. М.: Наука. 2005. 245 с.

Мамонтов Ю. С. Материалы по флоре мхов и печеночников Турьего мыса // Летопись природы Кандалакшского заповедника за 2013 год (ежегодный отчет). / Под ред. Е. Л. Толмачевой. Кандалакша. 2014. Т. 1. Ч. 2. С. 50–95.

Мелехин А. В. Дополнение к лишенобиоте Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 4. С. 105–107.

Мелехин А. В. Новые для Мурманской области и ее биогеографических районов виды лишайников // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 4(23). С. 73–81.

Никонов В. В., Лукина Н. В. Биогеохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: КНЦ РАН. 1994. 315 с.

Орлова М. А., Лукина Н. В., Смирнов В. Э., Артемкина Н. А. Влияние ели на формирование кислотности и плодородия почв в северотаежных ельниках кустарничково-зеленомошных // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1355–1367.

Орлова М. А., Лукина Н. В., Смирнов В. Э., Исаева Л. Г. Плодородие почв березовых лесов на северном пределе их распространения // Почвоведение. 2014. № 3. С. 327–339.

Поликарпова Н. В., Боровичев Е. А., Белкина О. А., Берлина Н. Г., Исаева Л. Г., Урбанавичюс Г. П., Шалыгин С. С., Костина В. А., Урбанавичене И. Н., Мелехин А. В., Андреева Е. Н. Роль Лапландского заповедника в сохранении фиторазнообразия Мурманской области // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием. Апатиты: КНЦ РАН. 2016. С. 132–137.

Руоколайнен А. В., Крутов В. И., Химич Ю. Р. Афиллофоровые и фитопатогенные макро- и микромицеты лесов заповедника «Пасвик» (Мурманская область) // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2011. Вып. 12. № 2. С. 29–34.

Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России. Анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга / Коллектив авторов. Под ред. Кобякова К.Н. СПб., 2011. 506 с.

Слуковская М. В., Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Дрогобужская С. В., Иноземцева Е. С., Марковская Е. Ф. Влияние горнопромышленных отходов на продуктивность злакового покрытия и химический состав грунта и растений в зоне воздействия комбината цветной металлургии // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Экологические исследования. 2014. № 6. С. 133–142.

Сухарева Т. А. Элементный состав листьев древесных растений в условиях техногенного загрязнения // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 3. С. 369–376.

Сухарева Т. А. Оценка состояния сосновых лесов в зоне влияния медно-никелевых комбинатов при уменьшении эмиссионной нагрузки // Известия Самарского НЦ РАН. 2013а. Т. 15. № 3(3). С. 1072–1076.

Сухарева Т. А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013б. № 6. С. 19–28.

Сухарева Т. А. Динамика содержания азота в хвое ели сибирской в условиях воздушного промышленного загрязнения // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014а. № 3. С. 102–105.

Сухарева Т. А. Сезонная динамика химического состава хвои ели сибирской на Кольском полуострове // Лесоведение. 2014б. № 2. С. 27–37.

Сухарева Т. А. Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 4. С. 70–82.

Сухарева Т. А., Лукина Н. В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104.

Урбанавичюс Г. П. Изменение разнообразия эпифитных лишайников в еловых лесах Мурманской области под влиянием аэротехногенных выбросов Мончегорского медно-никелевого комбината // Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения: Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1. Апатиты: КНЦ РАН. 2012. С. 130–132.

Урбанавичюс Г. П. Семейство *Verrucariaceae* Zenker в России. I. Род *Agonimia* Zahlbr. // Новости систематики низших растений. 2013. Т. 47. С. 279–296.

Урбанавичюс Г. П. Дополнения к лишенофлоре Мурманской области // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2014. Т. 119. Вып. 3. С. 77.

Урбанавичюс Г. П. Вклад заповедников в сохранение разнообразия лишайников Мурманской области // Вклад заповедной системы в сохранение биоразнообразия и устойчивое развитие: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 85-летию организации Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника и 100-летию заповедной системы России. Тверь: ТГУ. 2017. С. 553–557.

Урбанавичюс Г. П., Кутенков С. А., Фадеева М. А. Новые находки в России *Cladonia albonigra* Brodo & Ahti (Cladoniaceae, Ascomycota) из Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биogeография. 2014. Вып. 15. № 2. С. 165–167.

Урбанавичюс Г. П., Урбанавичене И. Н., Мелехин А. В. Лихенофлора Лапландского государственного природного биосферного заповедника (аннотированный список). Апатиты: КНЦ РАН. 2013. 158 с.

Урбанавичюс Г. П., Фадеева М. А. Значение заповедника «Пасвик» в сохранении разнообразия лишайников на Северо-западе России // Зеленый пояс Фенноскандии: материалы международной научно-практической конференции. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2013. С. 135–136.

Урбанавичюс Г. П., Фадеева М. А. Дополнение к лишенофлоре заповедника «Пасвик» (Мурманская область). II // Вестник Тверского государственного университета. Сер. Биология и экология. 2014. № 2. С. 111–123.

Урбанавичюс Г. П., Фадеева М. А. Новые для заповедника «Пасвик» (Мурманская область) виды лишайников и лишенофильных грибов // Труды Карельского научного центра. Серия Биогеография. 2015. № 4. С. 117–121.

Урбанавичюс Г. П., Фадеева М. А. Новые находки для лишенофлоры заповедника «Пасвик» (Мурманская область) // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2016. № 3. С. 97–102.

Урбанавичюс Г. П., Фадеева М. А. Дополнения к лишенофлоре заповедника Пасвик (Мурманская область) по материалам 2015–2016 гг. // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2017. № 6. С. 61–69.

Фадеева М. А., Дудорева Т. А., Урбанавичюс Г. П., Ахти Т. Лишайники заповедника «Пасвик» (аннотированный список видов). Апатиты: КНЦ РАН. 2011. 80 с.

Фадеева М. А., Урбанавичюс Г. П., Ахти Т. Дополнение к флоре лишайников заповедника Пасвик // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2013. Вып. 14. № 2. С. 101–104.

Химич Ю. Р. Афиллофороидные грибы на древесных интродуцентах зеленых насаждений города Апатиты // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16. № 3. С. 526–529.

Химич Ю. Р., Блинова И. В., Александров Г. Н. *Microstoma protractum* (Fr.) Kanouse и *Sarcosoma globosum* (Schmidel) Casp. – редкие представители порядка Pezizales в Мурманской области // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2013. Т. 118. Вып. 1. С. 84–86.

Химич Ю. Р., Змитрович И. В., Руоколайнен А. В. Афиллофороидные грибы заповедника «Пасвик» // Микология и фитопатология. 2015. Т. 49. № 4. С. 234–241.

Химич Ю. Р., Исаева Л. Г. К микобиоте Хибинского горного массива (Мурманская область) // Новости систематики низших растений. 2014. Т. 48. С. 219–225.

Химич Ю. Р., Котиранта Х., Боровичев Е. А. Новые находки афиллофороидных грибов в Мурманской области. 1. Урбанизированные территории // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биогеография. 2016. № 7. С. 100–105.

Химич Ю. Р., Ширяев А. Г., Исаева Л. Г., Берлина Н. Г. Напочвенные афиллофороидные грибы Лапландского заповедника // Труды Карельского научного центра РАН. Серия биогеография. 2017. № 1. С. 50–61.

Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья. 1995. 990 с.

Штабровская И. М., Зенкова И. В. Исследование температуры горных почв Хибин с использованием автоматических термодатчиков // Использование современных информационных технологий в ботанических исследованиях: Материалы межд. научн.-практ. конф. Апатиты: КНЦ РАН. 2017а. С. 134–136.

Штабровская И. М., Зенкова И. В. Сравнительная динамика температуры подстилки в лишайниковой и кустарничковой тундре Хибин // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017б. Вып. 14. С. 461–464.

Bolshakov S. Yu., Potapov K. O., Ezhov O. N., Volobuev S. V., Khimich Yu. R., Zmitrovich I. V. New species for mycobiota of Russia. 1. Report 2016 // Микология и фитопатология. 2016. Т. 50. Вып. 5. С. 275–286.

Borovichev E. A. Checklist of liverworts of the Lapland State Nature Biosphere Reserve (Murmansk Province, Russia) // Folia Cryptogamica Estonica. 2014. Vol. 51. P. 1–11.

Borovichev E. A., Boychuk M. A. Checklist of liverworts of the Pasvik State Nature Reserve (Murmansk Region, Russia) // Folia Cryptogamica Estonica. 2016. Fasc. 53. P. 1–8.

Borovichev E. A., Koroleva N. E. Ecological and coenological analysis of liverworts in the forests of the Lapland State Nature Biosphere Reserve (Murmansk Province) // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8. № 7. P. 845–853.

Ershov V. V., Lukina N. V., Orlova M. A., Zukert N. V. Dynamics of Snowmelt Water Composition in Conifer Forests Exposed to Airborne Industrial Pollution // Russian Journal of Ecology. 2016. Vol. 47. № 1. P. 38–44.

Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A. Checklist of mosses of East Europe and North Asia // Arctoa. 2006. Vol. 15. P. 1–130.

Index Fungorum. CABI Database. URL: <http://www.indexfungorum.org> (год обращения: 2017).

Isaeva L. G., Khimich Iu. R., Zmitrovich I. V., Berlina N. G. Towards an inventory of the mycobiota of the Lapland State Nature Biosphere Reserve (Murmansk Region, North-West Russia) // Folia Cryptogamica Estonica. 2015. Fasc. 52. P. 29–33.

Konstantinova N. A., Bakalin V. A., Andreeva E. N., Bezgodov A. G., Borovichev E. A., Dulin M. V., Mamontov Yu. S. Checklist of liverworts (Marchantiophyta) of Russia // Arctoa. 2009. Vol. 18. P. 1–63.

Koroleva N. E., Borovichev E. A. Rare plant communities with abundance of *Sauteria alpina* (Nees) Nees in the arctic tundra of Svalbard // Arctoa. 2014. Vol. 23. P. 5–10.

Melechin A. *Gyalecta biformis* and *Gyalidea diaphana* new to Russia // Graphis Scripta. 2016. Vol. 28. P. 11–13.

Orlova M. A., Lukina N. V., Tutubalina O. V., Smirnov V. E., Isaeva L. G., Hofgaard A. Soil nutrient's spatial variability in the forest–tundra ecotones on the Kola peninsula, Russia // Biogeochemistry. 2013. Vol. 113. Issue 1–3. P. 283–305.

Red Data Book of European Bryophytes. Trondheim, 1995. 290 p.

Söderström L., Hagborg A., von Konrat M., Bartholomew-Began S., Bell D., Briscoe L., Brown E., Cargill D. C., Costa D. P., Crandall-Stotler B. J., Cooper E. D., Dauphin G., Engel J. J., Feldberg K., Glenny D., Gradstein S. R., He X., Heinrichs J., Hentschel J., Ilkiu-Borges A. L., Katagiri T., Konstantinova N. A., Larrain J., Long D. G., Nebel M., Pócs T., Felisa Puche F., Reiner-Drehwald E., Renner M. A. M., Sass-Gyarmati A., Schäfer-Verwimp A., Moragues J. G. S., Stotler R. E., Sukkharak P., Thiers B. M., Uribe J., Váňa J., Villarreal J. C., Wigginton M., Zhang L., Zhu R.-L. World checklist of hornworts and liverworts // PhytoKeys. 2016. Vol. 59. P. 1–828.

Tiunov A. V., Hale C. M., Holdsworth A. R., Vsevolodova-Perel T. S. Invasion patterns of Lumbricidae into the previously earthworm-free areas of northern Europe and the western Great Lakes region of North America // Biological Invasions. 2006. № 8. P. 1223–1234.

Urbanavichus G. P. Lichens and lichenicolous fungi new for Russia and Murmansk Province from Pasvik Reserve // Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series. 2015. Vol. 120. № 3. P. 74–75.

Urbanavichus G. Additions to the lichens and lichenicolous fungi of Pasvik Reserve, Murmansk region, Russia // Graphis Scripta. 2016. Vol. 28. № 1-2. P. 8-10.

Volobuev S., Okun M., Ordynets A., Spirin V. The *Phanerochaete sordida* group (Polyporales, Basidiomycota) in temperate Eurasia with a note on *Phanerochaete pallida* // Mycological Progress. 2015. Vol. 14. P. 80.

Zenkova I. V. Myriapods (Myriapoda) occurring on plains and in mountain ecosystems on the Kola Peninsula (Russia) // Acta Societatis Zoologicae Bohemicae (Czech Zoological Society Publisher). 2016. Vol. 80. № 1. P. 87–99.

Zenkova I. V., Rapoport I. B. Species richness and high-altitude distribution of earthworms in the Khibiny Massive (Murmansk region) // Zoology in the Middle East. Suppl. 1. 2014. P. 141-151.

Zmitrovich I. V., Ezhov O. N., Khimich Yu. R. Niemelaea, a new genus of Meruliaceae (Basidiomycota) // Agriculture and Forestry. 2015. Vol. 61. P. 23–31.

Сведения об авторах

Исаева Людмила Георгиевна,

Кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией Наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты, Кировск; isaeva@inep.ksc.ru

Сухарева Татьяна Алексеевна,

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; s.tat.a@mail.ru

Боровичёв Евгений Александрович,

Кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; borovichyok@mail.ru

Урбанавичюс Геннадий Пранасович,

Кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; urbanavichus@inep.ksc.ru

Химич Юлия Ростиславовна,

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; ukhim@inbox.ru

Зенкова Ирина Викторовна,

Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; zenkova.home@yandex.ru

Артемкина Наталья Александровна,

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; artemkina@inep.ksc.ru

Горбачева Тамара Тимофеевна,

Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; podzol_gorby@mail.ru

Ершов Вячеслав Вячеславович,

Младший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; slavo91@gmail.com

Мамонтов Юрий Сергеевич,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина, Москва; yur-mamontov@yandex.ru

Иванова Екатерина Александровна,

Старший лаборант-исследователь Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; ivanova@inep.ksc.ru

Isaeva Lyudmila Georgievna,

PhD (Agriculture), Head of the Terrestrial Ecosystems Laboratory of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; isaeva@inep.ksc.ru

Sukhareva Tat`ana Alekseevna,

PhD (Biology), Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; s.tat.a@mail.ru

Borovichev Eugene Alexandrovich,

PhD (Biology), Deputy Director for Science of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; borovichyok@mail.ru

Urbanavichus Gennadii Pranasovich,

PhD (Geography), Lead Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; urbanavichus@inep.ksc.ru

Khimich Yulia Rostislavovna,

PhD (Biology), Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; ukhim@inbox.ru

Zenkova Irina Viktorovna,

PhD (Biology), Lead Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; zenkova.home@yandex.ru

Artemkina Natal`a Aleksandrovna,

PhD (Biology), Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; artemkina@inep.ksc.ru

Gorbacheva Tamara Timofeevna,

PhD (Biology), Lead Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; podzol_gorby@mail.ru

Ershov Vyacheslav Vyacheslavovich,

Junior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; slavo91@gmail.com

Mamontov Yurii Sergeevich,

PhD (Biology), Researcher of N. V. Tsitsin Main Botanical Garden RAS, Moscow; yur-mamontov@yandex.ru

Ivanova Ekaterina Aleksandrovna,

Senior laboratory assistant researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; ivanova@inep.ksc.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86
УДК 624.131.41

**Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, Д. Б. Денисов, С. А. Валькова,
О. И. Вандыш, П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, И. М. Королева,
А. Л. Косова, А. А. Черепанов**

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН
Лаборатория водных экосистем*

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ФЕННОСКАНДИИ

Аннотация

Рассмотрены основные результаты многолетних комплексных исследований водных экосистем Фенноскандии, осуществляемых Лабораторией водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН. Отмечены аспекты снижения ресурсного потенциала поверхностных вод региона в условиях глобального изменения климата и окружающей среды и вследствие их нерационального использования. Показаны: увеличение токсичности водной среды, радикальная структурно-функциональная перестройка сообществ гидробионтов, изменение трофического статуса и снижение стабильности пресноводных экосистем, повышение рисков катастрофических деградиционных изменений. Предложены показатели качества поверхностных вод Мурманской области с учетом региональных особенностей. Обозначены современные направления и перспективы дальнейших исследований пресноводных ресурсов Евро-Арктического региона.

Ключевые слова:

водные экосистемы, гидробионты, ихтиофауна, тяжелые металлы, донные отложения, критерии оценки качества вод.

**N. A. Kashulin, V. A. Dauvalter, D. B. Denisov, S. A. Valkova,
O. I. Vandysh, P. M. Terentjev, E. M. Zubova, I. M. Koroleva,
A. L. Kosova, A. A. Cherepanov**

COMPLEX INVESTIGATIONS OF FENNOSCANDIAN FRESHWATER ECOSYSTEMS

Abstract

There are surveyed main results of long-term complex studies of the freshwater ecosystems of Fennoscandia carried out by the Laboratory of Aquatic Ecosystems. Among them are reduce of surface waters resources in the Murmansk region in the course of global climate change and the environment irrational use, increase of aquatic toxicity, radical change of the structural and functional characteristics of aquatic communities, change in trophic status of lakes, decrease of the stability of freshwater ecosystems, and growing risk of catastrophic degradation. Based on regional peculiarities, some indicators of the surface waters quality of the Murmansk region have been proposed. The modern directions and prospects of further research of the freshwater resources in the Arctic are indicated.

Keywords:

freshwater ecosystems, aquatic organisms, ichthyofauna, heavy metals, sediments, water quality assessment criteria.

Лаборатория водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН — одно из немногих научных подразделений Мурманской области, осуществляющих комплексные экологические исследования субарктических пресноводных экосистем и их компонентов. Значимость проводимых исследований очевидна: пресная вода в современном мире становится стратегическим природным ресурсом, определяющим экономическое благосостояние стран и регионов. В Арктике поверхностные воды — это не только важнейший питьевой и продовольственный ресурс, определяющий экономическое и социальное развитие коренных северных народов, но и источник их исторического и культурного наследия.

В Северной Фенноскандии сосредоточено огромное количество разнотипных водоемов и водотоков, однако их современное состояние свидетельствует о значительном истощении всех видов водных ресурсов, что порождает целый комплекс серьезных экологических последствий регионального масштаба. Качество северных вод стремительно деградирует вследствие низкой устойчивости к внешним воздействиям, нерационального использования, глобальных и локальных изменений окружающей среды и климата. Уязвимость пресноводных экосистем связана с тем, что они интегрируют все изменения, происходящие на территории их водосборов, и аккумулируют большую часть загрязняющих веществ. Их биоразнообразие очень чувствительно к климатическим изменениям, нарушению гидрологического режима, ухудшению качества воды и вселению новых видов.

Вследствие особенностей распространения воздушных масс Северного полушария большая часть загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу в индустриально-развитых странах, переносится в заполярные широты, осаждаются и накапливаются в арктических экосистемах. Дополнительными агентами являются местные источники загрязнения. Интенсивное развитие промышленности в Мурманской области в XX веке, разведка и освоение новых запасов полезных ископаемых в последние десятилетия, наряду с биосферным трансграничным переносом поллютантов, привели к росту антропогенной нагрузки на субарктические пресноводные экосистемы, трансформации их ключевых биологических, геохимических и физических процессов и, в итоге, к дефициту качественных пресных вод. В настоящее время под угрозой находятся не только запасы питьевой и используемой в промышленных целях воды, но и ценные виды гидробионтов, включая промысловые виды рыб.

К этим проблемам необходимо добавить организационные причины деградации водных ресурсов: отсутствие стратегии и контроля за их использованием; неадекватное управление (в т.ч. неэффективное использование интеллектуальных и финансовых вложений, устаревшие технические и технологические решения); отсутствие реестров, учитывающих количественные и качественные характеристики вод; устаревшую нормативную базу, не принимающую в расчет природные особенности региона; недостаток информации, научных знаний и понимания процессов, протекающих в водоемах. В результате этих причин в Мурманской области сложилась парадоксальная ситуация, когда при огромных запасах пресных вод большинство населенных пунктов испытывают дефицит качественной питьевой воды. Промышленное рыболовство на внутренних водах практически прекратилось.

Скорость указанных изменений в последние годы стремительно возрастает. Многие проблемы, обуславливающие деградационные процессы в поверхностных водах Арктики, достаточно новы для региона и до конца не изучены, что затрудняет

поиск адекватных ответов на современные вызовы. Для этого требуется понимание механизмов трансформации как отдельных компонентов, так и экосистем в целом, что может быть обеспечено проведением комплексных исследований, включающих анализ современного состояния абиотических и биотических компонентов экосистем и историческую реконструкцию долговременных изменений водоемов. Такая программа исследований реализуется Лабораторией водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН, их основные результаты представлены в данной статье.

История исследований

Систематические исследования ответных реакций водных экосистем арктического региона на антропогенное воздействие начались с создания Лаборатории охраны природы Кольского филиала АН СССР в 1978 году. Спустя 11 лет на базе этой лаборатории был основан ИППЭС КНЦ РАН, в составе которого была организована Лаборатория водных экосистем. Основной задачей нового подразделения была разработка теоретических основ нормирования антропогенной нагрузки на водные экосистемы Севера. В лаборатории сформировалась сильная научная школа специалистов по геохимии и экологии водных экосистем, которая выполняла комплексные исследования механизмов круговорота загрязняющих веществ в поверхностных водах. В этот период были получены уникальные данные, включая информацию об условиях формирования качества вод и донных отложений, о биоразнообразии и структуре сообществ гидробионтов. Были сформулированы критерии оценки состояния организмов, популяций и сообществ гидробионтов; предложены конкретные методы расчета критических нагрузок по фактору закисления вод, их токсичного загрязнения металлами и комплексного многофакторного загрязнения сточными водами (Моисеенко, Яковлев, 1990; Моисеенко и др., 1996; Моисеенко, 1997).

Высокая квалификация специалистов лаборатории подтверждалась их участием в ряде международных экологических проектов: AL:PE (1995 г.), АМАР (1998), MOLAR (1999), ИНТАС – ENV4-СТ-95-0007 (1995-1999), «Обследование озер в странах севера Европы (Норвегия, Финляндия, Швеция, Дания, Шотландия) и России (Кольский Север и Карелия)» (1995-1999), SPICE «Устойчивое развитие Печорского региона в условиях изменения окружающей среды и общества» (2000–2003), в проекте по гранту Института прикладной геологии Технологического университета г. Лулео (Швеция) «Геохимический круговорот элементов в водоемах, подверженных влиянию загрязнений предприятиями горно-металлургической индустрии» (1995–1996).

На рубеже XX и XXI веков в лаборатории развивались исследования фито-, зоопланктона и бентоса субарктических пресноводных водоемов (Вандыш, 2004; Шаров, 2004; Moiseenko et al., 1999; Vandysh, 2002), рыбного населения как индикатора антропогенной нагрузки (Лукин, 1995; Кашулин и др., 1999; Моисеенко, 2002; Кашулин, 2004), аналитические работы по оценке степени загрязнения донных отложений (Даувальтер, 1997, 1998; Dauvalter, 1994) и палеолимнологическое изучение исторической динамики озер на базе диатомового и хирономидного анализов (Моисеенко и др., 1997, 2000; Ильяшук, 2001; Каган, 2001; П'ушук, П'ушук, 2000, 2001).

Исследования по этим направлениям были поддержаны грантами РФФИ № 03-04-96160 «Оценка последствий долговременных воздействий малых доз загрязнения на водоемы Кольского Севера» (2003 г.) и № 07-05-96905 «Разработка

научных основ оценки и прогноза трансформации пресноводных экосистем Евро-Арктического региона под воздействием глобальных и локальных изменений окружающей среды» (2007); региональным грантом РФФИ № 14-05-98804р_север_а; Программой фундаментальных исследований ОНЗ РАН «История формирования бассейна Северного Ледовитого Океана и режим современных природных процессов Арктики (в рамках Полярного года)» (2007); Программой Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития» (2011-2014).

В 2002–2014 гг. масштабные исследования развернулись в приграничных районах России, Финляндии и Норвегии в пределах водосбора озерно-речной системы Паз (Патсойоки, Пасвик). Они были частью крупного международного проекта Kolarctic-ENPI «Trilateral cooperation on Environmental Challenges in the Joint Border Area» (ТЕС). Следует отметить, что международные экологические исследования с участием сотрудников Лаборатории водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН начались на приграничной территории еще в 1989 году, это позволило получить уникальные многолетние ряды наблюдений за состоянием водоемов заповедника «Пасвик» и его окрестностей. В ходе реализации ТЕС была разработана программа экологического мониторинга реки Паз, которая объединила основные положения национальных программ мониторинга стран-участниц проекта и рекомендации, выработанные на основе вновь полученных данных о водных объектах, включая участки самой реки и разнотипные озера, находящиеся на ее водосборной площади. Программа максимально адаптирована к экологическим условиям региона, в том числе, к изменениям объемов выбросов крупнейшего предприятия цветной металлургии – комбината «Печенганикель» Кольской горно-металлургической компании. В случае уменьшения или полного прекращения выбросов в результате модернизации производства программа позволяет проследить последующие изменения компонентов окружающей среды (State..., 2007; Ylikörkkö et al., 2015).

С 2015 года коллектив лаборатории проводит исследования по теме НИР «Научные основы рационального использования и устойчивого развития природных ресурсов поверхностных вод Евро-Арктического региона». Они нацелены на совершенствование методологии оценки современного состояния субарктических пресноводных экосистем в условиях глобальных и локальных изменений окружающей среды, палеоэкологическую реконструкцию истории их развития, разработку теоретических основ нормирования антропогенного воздействия. Приоритетными являются следующие направления:

- раскрытие особенностей формирования качества поверхностных вод и донных отложений в условиях воздействия горнодобывающих и перерабатывающих комплексов;
- изучение современного состояния и ответных реакций биоты пресноводных экосистем на изменения окружающей среды;
- выявление особенностей формирования биоразнообразия и продуктивности водоемов в условиях ландшафтного разнообразия и различных видов антропогенного воздействия;
- разработка методов биологической индикации процессов антропогенной трансформации пресноводных экосистем;
- разработка и развитие методических подходов реконструкции прошлых климатических и экологических условий по результатам био- и хемотратиграфического анализа состава донных отложений водоемов.

Методологическая концепция проводимых коллективом лаборатории современных экологических исследований пресноводных экосистем базируется на следующих принципах:

1) осуществление работ по единой программе в течение длительного времени для сопоставимости результатов, т.к. именно сравнительный подход позволяет выявить зависимости «доза-эффект» для биологических показателей, для большинства из которых понятие «нормы» не определено;

2) комплексность исследований: для раскрытия механизмов наблюдаемых эффектов изучаются как абиотические компоненты экосистем (вода, донные отложения), так и биота на различных уровнях организации (организм, популяция, сообщество) и на различных уровнях трофических сетей;

3) верификация палеоклиматических данных на основе сочетания палеолимонологических методов реконструкции исторической динамики экосистем и современных долговременных наблюдений.

Основные результаты современных исследований, проводимых сотрудниками лаборатории, представлены ниже.

Гидрохимические исследования субарктических водоемов

Защелачивание поверхностных вод. Одной из актуальных проблем, с которой лимнологи северных стран столкнулись еще в 70-х годах прошлого столетия, стало защелачивание поверхностных вод и территорий водосборов (Turk, Campbell, 1987). Наиболее чувствительными оказались водоемы с кислотонейтрализующей емкостью воды менее 100 мкмоль-экв/л: в них, в результате выпадения атмосферных осадков с $\text{pH} < 5.6$, нарушается природное кислотно-щелочное равновесие и происходит обогащение воды биогенными веществами, содержащими азот и серу (Sullivan et al., 2011). Уменьшение буферной емкости вод в условиях кислотной нагрузки сопровождается снижением их pH , увеличением концентрации неорганического алюминия и других ионов, токсичных для гидробионтов (Cd^{+2} , Pb^{+2} и др.). В результате сложных взаимосвязанных изменений физико-химических параметров среды обитания трансформируется структура и продуктивность водных экосистем, происходит замещение и гибель ценных видов гидробионтов (Muniz, 1984; Hestagen et al., 1998; Sullivan et al., 2011; Kashulin et al., 2007; Lappalainen et al., 2007).

Основной источник кислотообразующих соединений, поступающих в атмосферу — это пирометаллургические процессы и сжигание органического топлива. В Мурманской области пик выбросов отмечался в конце 80-х гг. прошлого столетия и привел к выраженному защелачиванию поверхностных вод (Мониторинг..., 2010). С середины 90-х гг., в результате усовершенствования технологических процессов на предприятиях цветной металлургии и перехода на местные малосернистые руды, эмиссия SO_2 в атмосферу значительно уменьшилась. Долговременный мониторинг качества вод фоновых озер области в процессе ослабления кислотной нагрузки выявил снижение роли сульфатов и натрия в балансе основных ионов, определяющих степень минерализации вод. В озере Шуонияур (Печенгский район Мурманской области, $69^{\circ}14,5351'$ с.ш., $30^{\circ}00,9660'$ в.д.) за период 1992-2004 гг. среднее содержание сульфат-ионов SO_4^{2-} снизилось на 1.39 мг/л (достоверно, $t = 5.00$) (рис. 1). Установлена конгруэнтная зависимость убыли валовых концентраций SO_4^{2-} в воде озера за указанный период наблюдений от суммарных среднегодовых объемов эмиссии SO_2 предприятиями Кольской ГМК, действующими в населенных пунктах Заполярный и Никель ($R = 0.852$, при $R_{\text{кр}} = 0.847$ и $p = 0.001$).

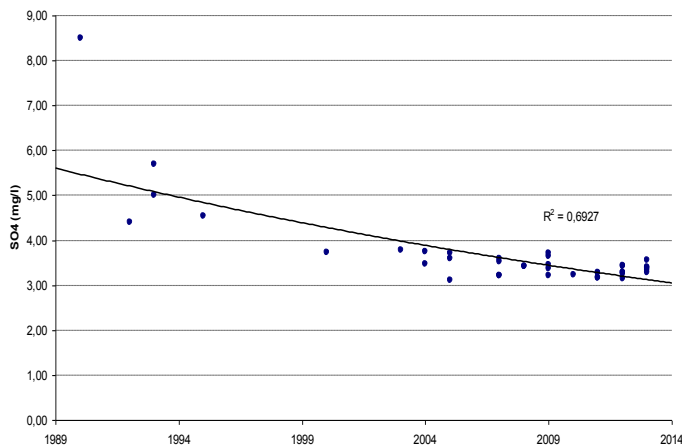


Рис. 1. Изменение содержания сульфат-иона SO_4^{2-} (мг/л) в поверхностном горизонте вод озера Шуонияур в 1992–2013 гг.

Водосборная территория оз. Шуонияур имеет высокий показатель кислотонейтрализующей способности (ANC) почвогрунтов, поэтому даже незначительное снижение аэротехногенной нагрузки или стабилизация объемов промышленной эмиссии обуславливают выраженное повышение ANC воды. Достоверное увеличение концентрации гидрокарбонат-иона в озерной воде сопровождается устойчивыми трендами роста содержания кальция и значений pH и ANC на фоне сглаживания амплитуды сезонных колебаний этих показателей — ΔAlk и ΔpH ($\Delta\text{Alk} = \text{Alk}_{\text{осень}} - \text{Alk}_{\text{весна}}$, $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{осень}} - \text{pH}_{\text{весна}}$) (рис. 2, 3). Эти зависимости свидетельствуют о повышении кислотонейтрализующей способности воды озера в многолетней динамике.

Несмотря на снижение объемов выбросов кислотообразующих соединений и, следовательно, кислотной нагрузки на водные экосистемы, произошедшее после 1992 года, началом стабилизации буферных систем в водоемах региона можно считать 2004 год. Инертность ответной реакции субарктических водоемов объясняется спецификой формирования их гидрохимического состава, который определяется комплексом химических, биологических и антропогенных процессов, протекающих как в самих водоемах, так и на территории их водосборов (Беус и др., 1976; Никаноров, Жулидов, 1991; Никаноров, 2001; Moldan, Cherny, 1994). Чувствительность водоемов к закислению зависит от способности многокомпонентных кислотонейтрализующих систем самого водоема (щелочность/ $\text{ANC}_{\text{воды}}$) и почвогрунтов водосборной площади ($\text{ANC}_{\text{почвы}}$ /суммарная эквивалентная концентрация обмениваемых щелочных катионов) нейтрализовать кислотные компоненты атмосферных выпадений. На кислотонейтрализующую способность почвогрунтов влияют катионообменные и инфильтрационные характеристики верхних почвенных горизонтов, тип материнской породы, кислотонейтрализующая способность минерального горизонта С, отношение эквивалентной концентраций Al^{3+} к сумме щелочных элементов (Nilsson, Bergquist, 1983; Nilsson, 1985; Clayton et al., 1991; Moldan, Cherny, 1994; Henricsen et al., 2002; Nanus et al., 2009; Sullivan et al., 2011). Устойчивость водоемов к закислению зависит от географической зональности (Clow et al., 2003), размеров водоема, площади водосбора и соотношения этих параметров, наличия растительного покрова (Clow, Sueker, 2000) и других факторов.

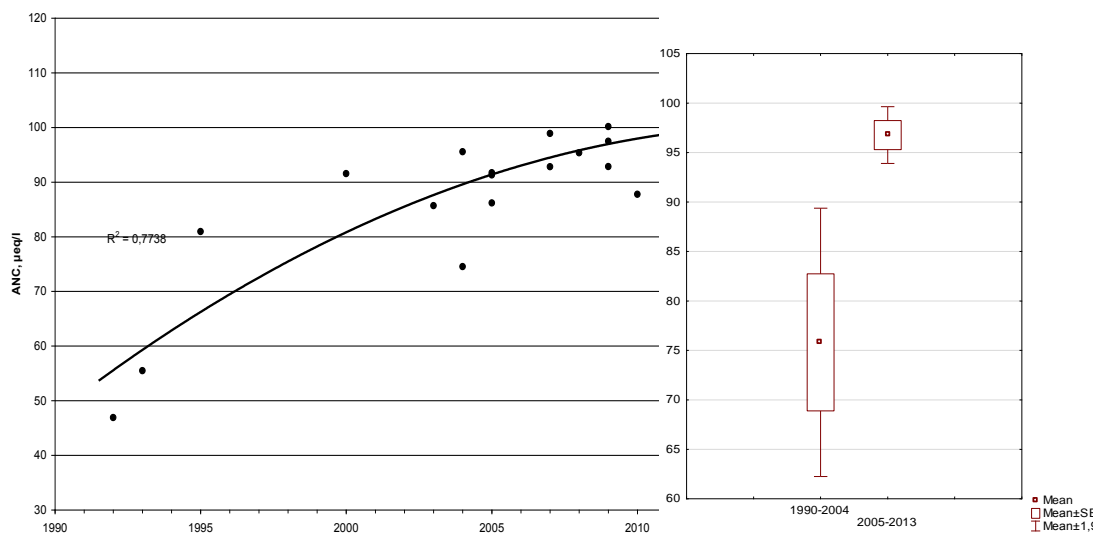


Рис. 2. Изменение кислотонейтрализующей способности (ANC, мк-экв/л) воды оз. Шуоньяур за период 1992–2013 гг. Слева — многолетний тренд роста ANC; справа — средние показатели ANC за периоды 1992–2004 и 2005–2013 гг.

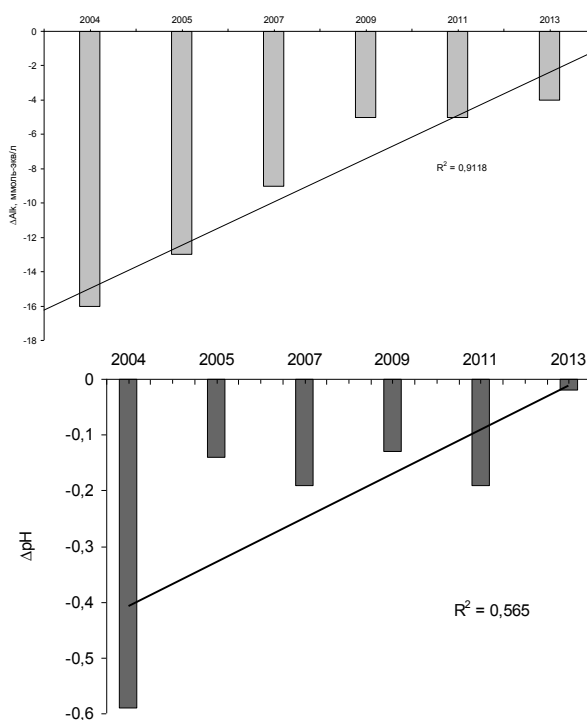


Рис. 3. Динамика сезонных (весна-осень) колебаний щелочности (ΔAlk , ммоль-экв/л) и кислотности (ΔpH) вод поверхностного горизонта оз. Шуоньяур в 2004–2013 гг.

Снижение кислотной нагрузки сопровождалось достоверным ростом содержания биогенных элементов азота и фосфора и увеличением общего количества органического вещества в воде, что указывает на интенсификацию процесса образования первичной продукции в водоеме.

Следствием стабилизации кислотонейтрализующей емкости воды после ослабления кислотной нагрузки стало снижение валовых содержаний металлов в воде и уменьшение их вариабельности после 2004 года. За период 2005–2013 гг. по сравнению с 1990–2004 гг. среднее содержание Al в воде снизилось на 30,5 мкг/л (достоверно: $t = 2,34$), Sr и Zn — на 1,71 и 1,04 мкг/л соответственно.

Тренды изменения концентраций Cu и Ni в воде имеют более сложный характер. Согласно официальным статистическим данным, в 1990–2009 гг. в окрестностях п. Никель и г. Заполярный суммарные объемы эмиссии аэрозолей Ni возросли, а Cu — сокращались (Мониторинг..., 2010). Нашими исследованиями установлено достоверное снижение концентрации Ni в воде оз. Шуонияур в 1990–2000 гг. и увеличение содержания этого металла, начиная с 2000 г. Динамика содержания Cu сходна, но выражена в меньшей степени (рис. 4).

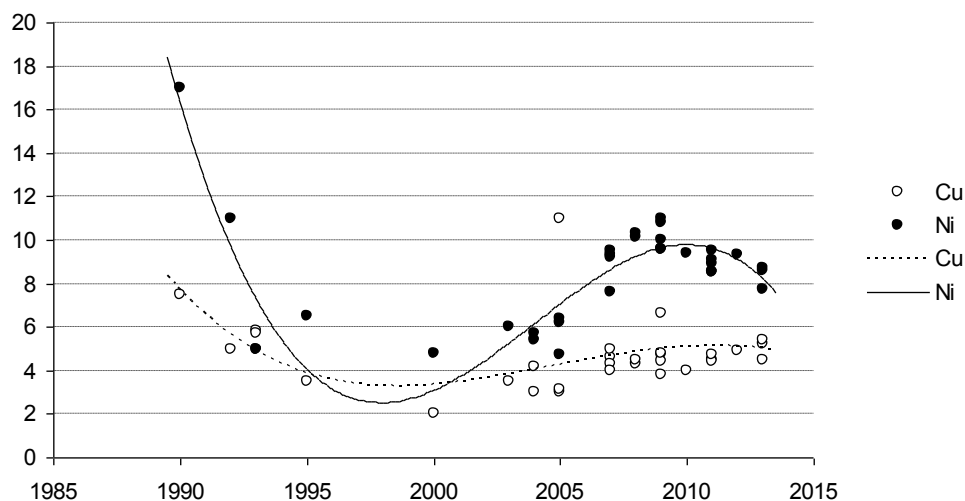


Рис. 4. Изменение содержания Ni и Cu (мкг/л) в воде озера Шуонияур в 1992–2013 гг.

Содержание Cu и Mn в воде оз. Шуонияур увеличилось с 2004 года на 0,88 и 0,50 мкг/л соответственно, что свидетельствует об усилении загрязнения озера этими элементами и тяжелыми металлами в целом, несмотря на стабилизацию кислотонейтрализующей способности воды в диапазоне значений 82–96 мкмоль-экв/л.

Аккумуляция тяжелых металлов в донных отложениях. Геохимические исследования водоемов Мурманской области демонстрируют устойчивый тренд усиления их загрязнения тяжелыми металлами (ТМ) (Кашулин и др., 2010, 2011). Наиболее показательны процессы накопления ТМ в поверхностных слоях донных отложений (ДО), сформированных за последние десятилетия. Они наблюдаются как в озерах в зоне непосредственного влияния промышленных предприятий, так и в удаленных районах, ранее считавшихся фоновыми.

По результатам исследований химического состава ДО водоемов реконструирована хронология выпадения ТМ в европейской части арктической зоны России начиная с XIV века (Даувальтер и др., 2015). Колонки ДО отобраны в озерах в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель» на приграничной территории России, Норвегии и Финляндии и проанализированы послойно через 0,5 см; возраст ДО определен по хронологии ^{210}Pb . Установлены относительно постоянные средние скорости осадконакопления в исследованных озерах в пределах 0,7–1,6 мм/год.

Заметная аккумуляция халькофильных элементов (Cd, Pb, Hg и As) в датированных ДО озер зафиксирована в начале XIX века, вероятно, в связи с индустриальной революцией в европейских странах, увеличением атмосферных выбросов в окружающую среду и их воздушной миграцией в направлении Арктики. Повышенным содержанием Ni и Cu отличались слои ДО, датированные серединой XIX столетия, а максимальным накоплением этих и ряда других ТМ — 70–80 гг. прошлого столетия как следствие интенсификации деятельности металлургических предприятий (рис. 5). Значительное увеличение содержания

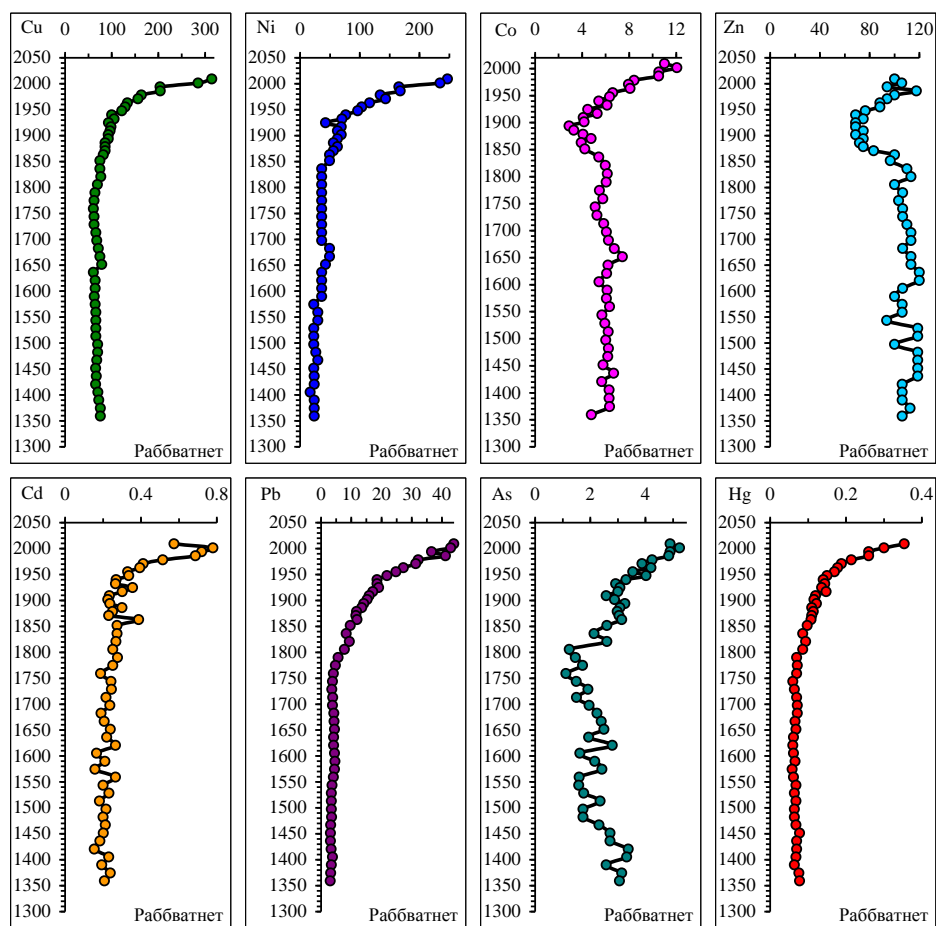


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций тяжелых металлов (мкг/г сухого веса) в датированных донных отложениях озера Раббватнет (Северная Норвегия, 30 км к северу от медно-никелевого комбината «Печенганикель»)

ТМ в середине прошлого века связано с бурным развитием промышленности после Великой Отечественной войны, возобновлением металлургического производства в регионе и использованием этилированного бензина. По состоянию на 2010 год, в озерах северо-западной части Мурманской области концентрация большинства ТМ в поверхностных слоях ДО была выше, чем в периоды 1989–1993 и 2002–2004 гг. (Даувальтер и др., 2012). В последние одно-два десятилетия в поверхностных слоях ДО большинства исследованных озер зафиксировано снижение содержания токсичных халькофильных элементов. Вероятно, это объясняется осознанием их высокой опасности и уменьшением объемов выбросов.

Распределение загрязняющих веществ в водных и наземных экосистемах.

Проведен анализ распределения металлов в различных компонентах водных и наземных экосистем приграничной территории России, Норвегии и Финляндии (Кашулин и др., 2009; Даувальтер и др., 2012; Current State ..., 2008). Получены регрессионные зависимости типа $y = kx^a$ содержания элементов (y) в воде, поверхностном слое 0–1 см ДО исследованных озер, подстилке и органогенном горизонте почвы по мере удаления (x) от металлургического комбината «Печенганикель» (рис. 6). Наибольшие концентрации ТМ, превышающие фоновые значения для Ni и Cu в 10–25 раз, для Co, Cd и As — в 2–5 раз, выявлены в озерах в донных отложениях на расстоянии до 10 км от комбината. На удалении до 20–30 км они снижаются для указанных элементов до 2–7 фоновых значений.

Водные и наземные экосистемы вблизи металлургических предприятий также подвержены загрязнению элементами щелочной (Na, K) и щелочноземельной (Ca, Mg, Sr) групп, т.к атмосферные пылевые выбросы комбинатов Кольской ГМК содержат большое количество породообразующих макроэлементов. По мере приближения к комбинату «Печенганикель» наблюдается подщелачивание почвы и озерной воды и повышение уровня pH в пробах воды и в водных вытяжках из органогенного горизонта почвы (рис. 6).

Для всех исследованных тяжелых (Ni, Cu, Co, Cd, Zn, As, Cr, Fe, Mn), Al, щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg) металлов выявлено закономерное увеличение содержания в звеньях водных и наземных экосистем: вода — подстилка — органогенный горизонт почвы — ДО. Процесс «концентрирования» элементов в основных компонентах экосистем сопоставим с явлением биомагнификации — увеличением концентрации химических веществ на каждой ступени экологической пирамиды, связанным с тем, что количество поглощаемой организмом пищи превышает его собственную массу, а выводятся химические вещества из организма не полностью.

Ртутное загрязнение водоемов. В вертикальном распределении токсичной для гидробионтов ртути в ДО крупнейшего в Мурманской области оз. Имандра впервые за многолетний период исследований отмечен приповерхностный максимум в зоне влияния стоков апатитнефелинового производства: от 0,6 до 2,3 мкг/г. Это почти на 2 порядка выше фоновых концентраций, составляющих для этого халькофильного металла в среднем 0,05 мкг/г (Даувальтер, Кашулин, 2015).

Максимальные концентрации Hg в ДО оз. Имандра отмечены на глубинах 8–14 см в зависимости от скорости осадконакопления (рис. 7). Они совпадают с повышенными концентрациями элементов из состава апатитнефелиновой руды (фосфор, щелочные и щелочноземельные металлы), однако фиксируются раньше по времени по сравнению с максимумами приоритетных для озер Мурманской области загрязняющих тяжелых металлов — Ni и Cu.

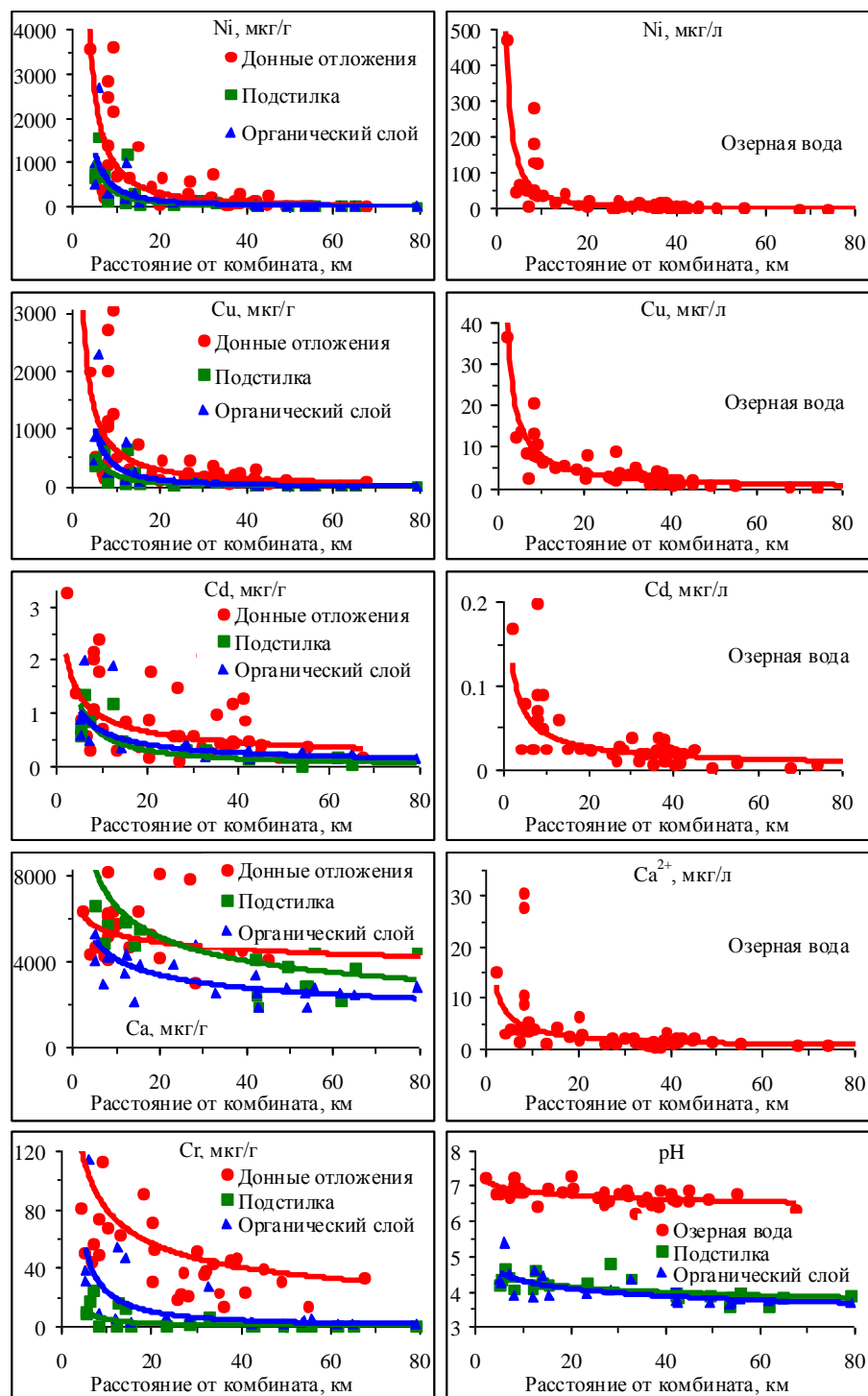


Рис. 6. Распределение концентраций исследованных элементов в воде (мкг/л), поверхностном слое донных отложений исследуемых озер, подстилке и органическом горизонте почвы (мкг/г) по мере удаления от металлургического комбината «Печенганикель»

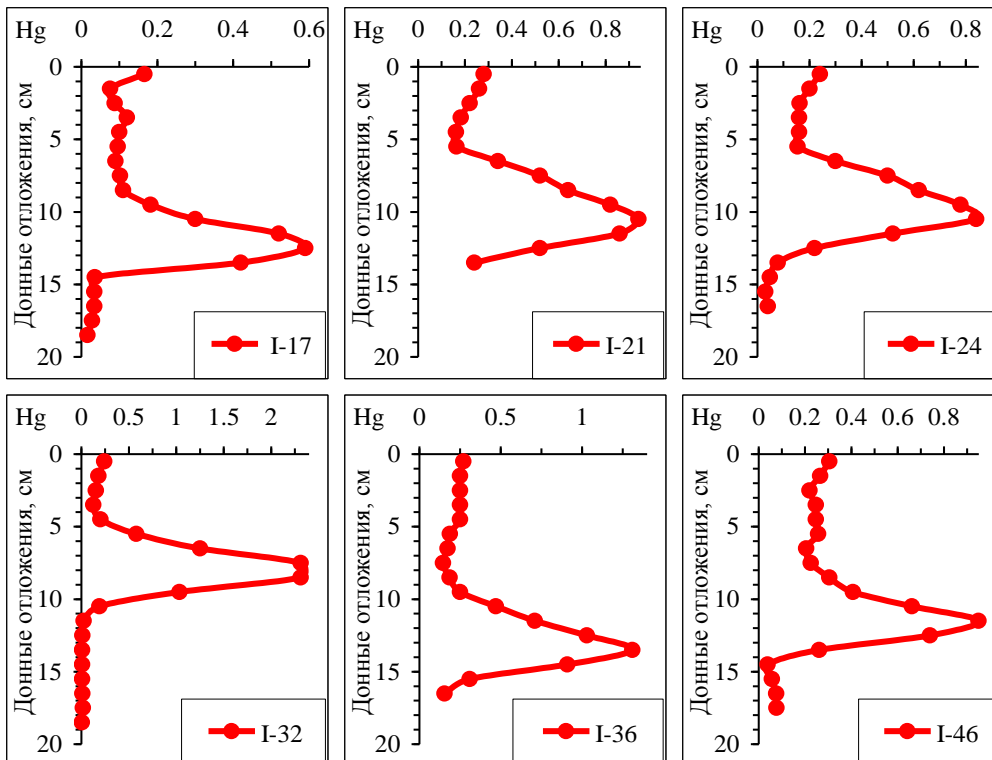


Рис. 7. Распределение ртути (мкг/г сухого веса) в донных отложениях исследованных участков оз. Имандра (I-17 — I-46) в зоне влияния стоков апатит-нефелинового производств

Пик загрязнения озера ртутью пришелся предположительно на 30–40-е гг. XX столетия. Возможно, в эти годы при разработке апатит-нефелиновых месторождений для взрывных работ в капсуль-детонаторах применяли гремучую ртуть. Во время Великой Отечественной войны на базе Горно-обогатительного комбината «Апатит» работал цех по изготовлению зажигательных фосфорных бомб, в которых гремучую ртуть использовали в качестве капсуля-воспламенителя.

Расчеты показывают, что масса накопленной в оз. Имандра ртути превышает 2,2 тонны, при этом более половины (около 1,3 т) сосредоточено в южной части плеса Большая Имандра, т.е. в зоне влияния стоков апатитнефелинового производства, еще 0,5 т — в северной части плеса, в зоне влияния стоков металлургического производства. Таким образом, в ДО плеса Большая Имандра аккумулировано более $\frac{3}{4}$ общего количества высокотоксичного металла. В плесах Йокостровская и Бабинская Имандра содержание Hg значительно ниже: 0,29 и 0,20 т соответственно. По направлению распространения потока сточных вод апатитнефелинового производства ОАО «Апатит» содержание Hg в поверхностном слое ДО снижается, свидетельствуя о том, что стоки этого предприятия являются основным источником загрязнения озера ртутью (рис. 8).

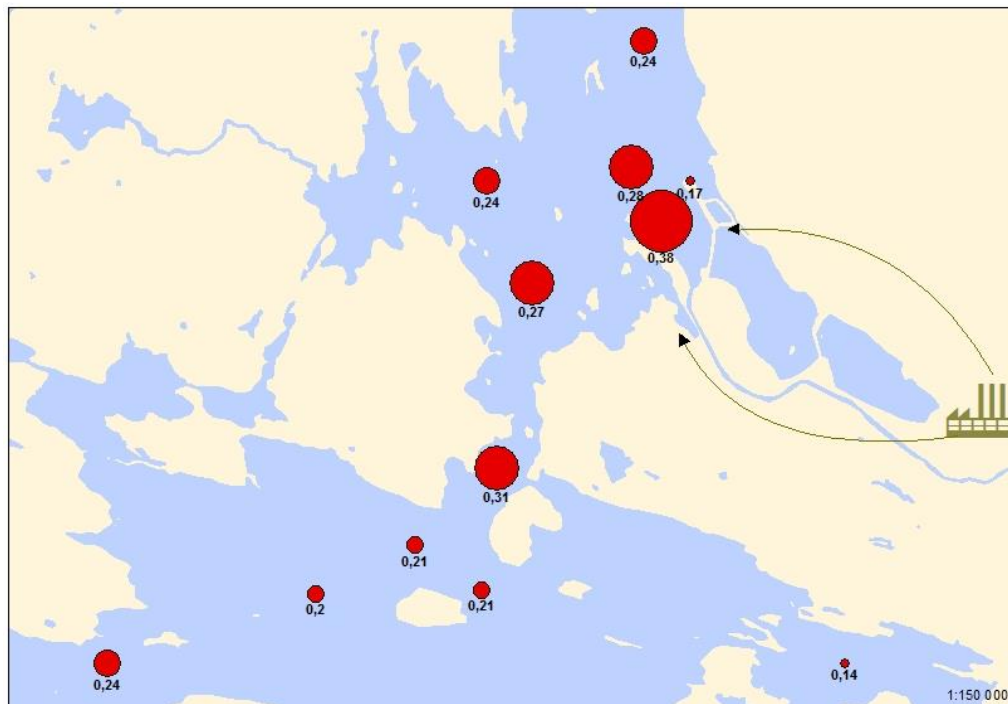


Рис. 8. Территориальное распределение ртути (мкг/г) в поверхностном (0-1 см) слое донных отложений озера Имандра

Каталогизация озер Мурманской области. По результатам исследования 400 водоемов, расположенных в восточной части Мурманской области на водосборах Баренцева и Белого морей, обобщены основные показатели функционирования субарктических пресноводных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов. На основе гидрографических, морфометрических, гидрохимических и гидробиологических данных представлена систематизированная экологическая характеристика озер Евро-Арктического региона (Кашулин и др., 2009, 2010, 2011, 2013).

Озера северо-восточной части Мурманской области не испытывают серьезного антропогенного влияния. Их химический состав в значительной степени определяется выпадением аэрозолей и осадков на поверхность водосбора со стороны незамерзающего Баренцева моря (Даувальтер, Кашулин, 2016). По мере удаления от береговой зоны к центральным районам Кольского полуострова количество морских аэрозолей, переносимых атмосферными осадками, заметно уменьшается; в озерных водах снижается содержание основных ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+}), как следствие, понижается минерализация вод; в ДО аккумулируется меньше ТМ (Cd, Pb, As, Cu, Zn) (рис. 9, 10).

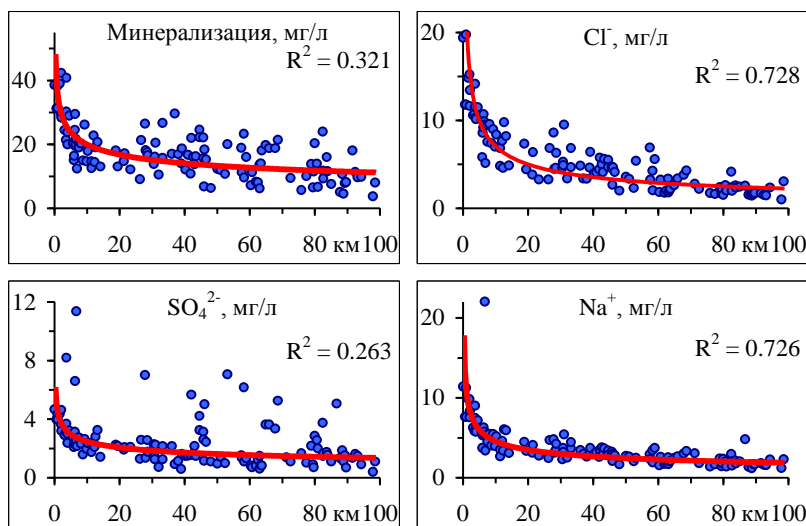


Рис. 9. Распределение величин общей минерализации и содержания основных ионов в воде озер северо-восточной части Мурманской области по мере удаления от побережья Баренцева моря

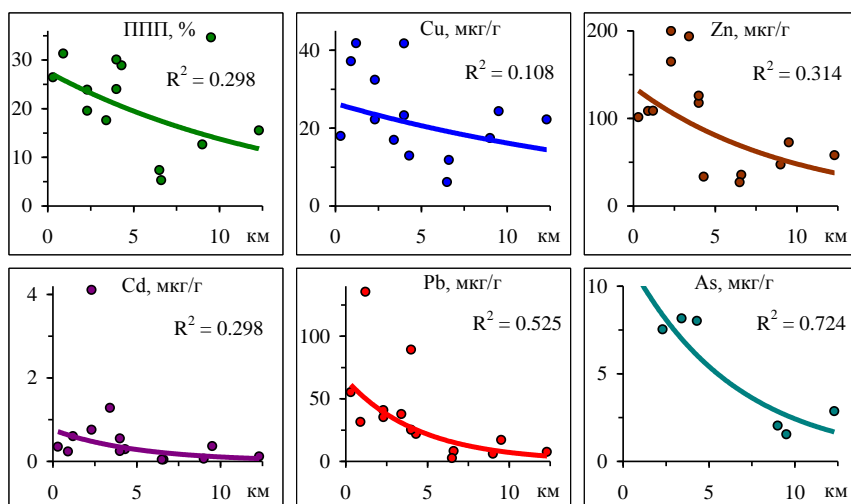


Рис. 10. Распределение величин потерь при прокаливании (ППП, %) и концентраций основных загрязняющих элементов в поверхностном (0–1 см) слое донных отложений озер северо-восточной части Мурманской области по мере удаления от побережья Баренцева моря

Практически для всех исследованных озер отмечено загрязнение ДО халькофильными элементами, в первую очередь — Pb, Cd, Hg и As, которые в последние десятилетия приобрели статус элементов глобального загрязнения. Выявлено увеличение содержания ТМ по направлению к поверхностным слоям ДО: вследствие низкой скорости осадконакопления наиболее загрязненными являются верхние 1–3 см донных отложений (рис. 11).

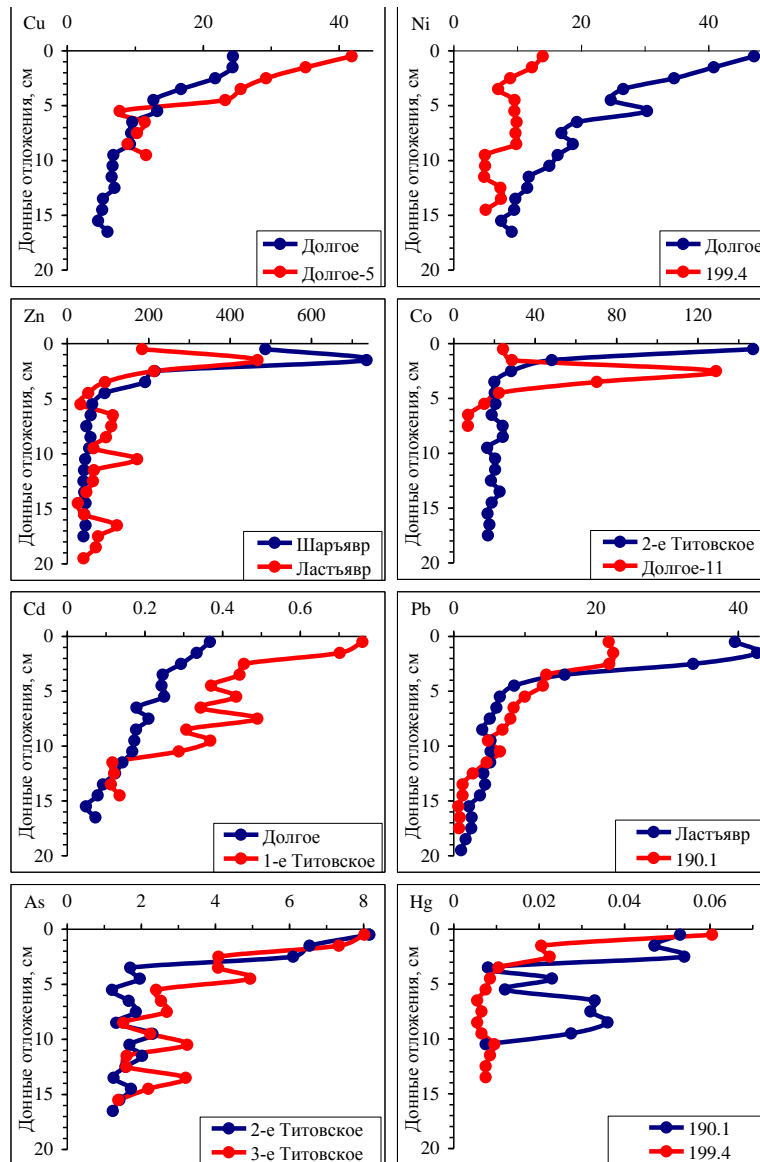


Рис. 11. Вертикальное распределение концентраций тяжелых металлов (мкг/г сухого веса) в донных отложениях озер северо-восточной части Мурманской области (бассейн Баренцева моря)

Гидробиологические исследования Водорослевые сообщества

Водорослевые сообщества (альгоценозы) формируют основу трофических сетей и относятся к наиболее показательным биоиндикаторам долговременного и многофакторного воздействия на водные экосистемы, включая изменение климата, промышленное загрязнение и нарушение естественных геолого-гидрохимических циклов. Исследования альгоценозов являются неотъемлемой составляющей комплексного экологического мониторинга водоемов.

Спецификой альгоценозов в пресноводных экосистемах высоких широт является способность к вегетации при низком содержании элементов биогенного питания (нитратов и фосфатов) и адаптационные механизмы, позволяющие с максимальной эффективностью использовать благоприятные для развития периоды в течение короткого гидробиологического лета.

Современная динамика фитопланктона. Многолетние исследования разнотипных водоемов Фенноскандии показали, что в последние десятилетия трансформация структурной организации и функционирования водных экосистем вызвана не только долговременным промышленным загрязнением, но и глобальными и локальными климатическими процессами (Кашулин и др., 2013; Денисов, Кашулин, 2016). Тренд в сторону более мягкого океанического климата многократно усиливает эвтрофирование вод и вызывает массовое развитие водорослей и цианобактерий в летний период в водоемах с мезотрофным и близким к нему трофическим статусом. С другой стороны, повышение температуры воды и смещение вегетации на более ранние сроки способствует активной утилизации биогенных элементов водорослями, что сглаживает резкие колебания их численности (Денисов и др., 2017).

На примере крупнейшего субарктического водохранилища — оз. Имандра выявлен положительный тренд роста биомассы фитопланктона в последние десятилетия, при этом зафиксированные значения (20 г/м^3 и более) соответствуют гиперэвтрофному статусу озера при фоновых показателях, не превышающих 1 г/м^3 . Несмотря на существенное снижение антропогенной нагрузки с 90-х гг. XX века и по настоящее время, максимальные значения биомассы фитопланктона выросли на порядок, что связано с кратковременными периодами массового развития диатомовых водорослей (Bacillariophyta) и цианобактерий (Cyanoprokaryota) (Денисов, Кашулин, 2016). Очевидно, решающая роль в этих процессах принадлежит положительным температурным аномалиям последних десятилетий вследствие глобальных климатических изменений. Дальнейшее потепление может привести к необратимым изменениям структурно-функциональной организации крупных водных экосистем Евро-Арктического региона: удлинению периода цветения потенциально токсичных цианобактерий, укорочению циклов оборота органического вещества, гибели ценных промысловых видов рыб, ухудшению качества вод и снижению их ресурсного потенциала.

Отмечены нарушения сезонной динамики фитопланктона на участках акватории оз. Имандра, подверженных антропогенной деятельности. Для наименее загрязненных вод плеса Бабинская Имандра и юго-западной части плеса Йокостровская Имандра характерна естественная динамика «классического» типа, с выраженным июльским максимумом биомассы водорослей. В северной части плеса Йокостровская Имандра из-за эвтрофирования вод биогенными элементами, источниками которых служат сточные воды апатитового производства и хозяйственно-бытовые стоки городов Кировск и Апатиты, сезонная динамика фитопланктона имеет ряд кардинальных отличий, среди которых осеннее увеличение биомассы при слабо выраженном июльском максимуме этого показателя (рис. 12).

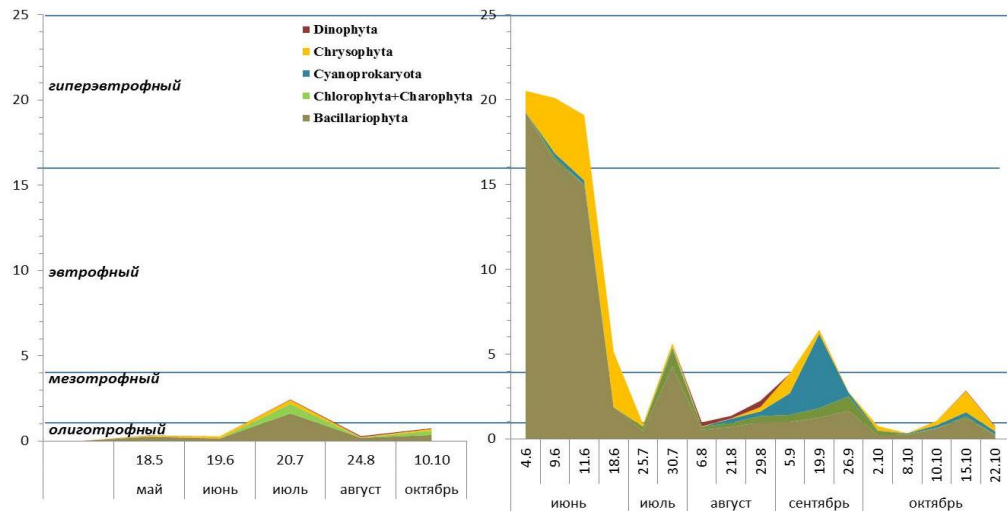


Рис. 12. Сезонная динамика биомассы фитопланктона (г/м³) и трофический статус вод в западной (слева) и северной (справа) частях плеса Йокостровская Имандра

В начале гидробиологического лета (конец мая — начало июня) максимальных сезонных значений достигает биомасса диатомовых водорослей, в основном, за счет бурного развития планктонного вида *Aulacoseira islandica*. В этот период могут развиваться и хризифитовые водоросли рода *Dinobryon* (Chrysophyceae). Вклад цианобактерий в общую биомассу фитопланктона незначителен — менее 0,1 г/м³. В конце июня — начале июля активность диатомей снижается, возрастает доля водорослей других групп, преимущественно зеленых (Chlorophyta), а также цианобактерий. Последние присутствуют в составе планктона с мая по октябрь, но их участие усиливается с июня по сентябрь, а максимальная биомасса формируется с июля по сентябрь и может достигать 4,3 г/м³.

Таким образом, причиной различий в сезонной динамике фитопланктона в разных частях акватории оз. Имандра следует считать эвтрофирование вод северной части плеса биогенными элементами, источниками которых служат производственные и хозяйственно-бытовые стоки.

Цветение субарктических водоемов. «Цветение» воды, вызываемое массовым развитием потенциально токсичных цианобактерий, приобрело в настоящее время глобальные масштабы, исследования этого явления актуальны во всем мире (Патова, 2014; Волошко, Сафронова, 2015; Ernst et al., 2009; Elliott, 2012). Цианобактерии способны вызывать гибель рыбы и наносить вред здоровью населения. Для европейского северо-запада массовое развитие цианобактерий стало новым вызовом: «цветение» субарктических водоемов отмечается регулярно и представляет угрозу качеству водных и гидробиологических ресурсов. В этой связи оценка роли представителей Cyanoprokaryota в экосистемных процессах пресноводных водоемов Евро-Арктического региона представляется важнейшей экологической задачей.

В оз. Имандра ежегодные локальные явления массового развития цианобактерий наблюдаются с 2000 года. Им предшествуют сравнительно высокие температуры воздуха, и сопутствуют штилевые условия, когда у поверхности воды образуются бактериально-водорослевые пленки,

перегоняемые слабым ветром в заливы и губы, где формируются их скопления. Очевидно, эти процессы интенсифицируются при благоприятном сочетании метеорологических и гидролого-гидрохимических условий и достаточном количестве биогенных элементов в воде, так как в акватории оз. Имандра «цветение» приурочено к зонам распространения стоков апатитонелефинового производства. Явление массового развития цианопрокариот характеризуется рядом специфических черт: оно начинается при прогреве воды до +16 °С и продолжается до ледостава, ограничено сравнительно изолированными участками акватории озера, распространится на открытые водные пространства лишь в штилевые периоды. Формирование плотных бактериально-водорослевых скоплений обусловлено легким ветром, направленным в сторону залива (губы), и последующим штилем. Локальные «цветения» не всегда сопровождаются высокой долей цианобактерий в составе фитопланктона, но именно в периоды их массового развития происходит гибель молоди рыб.

В 2014 года был зафиксирован рост биомассы цианобактерий во второй половине сентября за счет обильного развития представителей родов *Anabaena* (*A. contorta*, *A. ellipsoides*, *A. subcylindrica*) и *Dolichospermum* (*D. circinale*, *D. planctonicum*, *D. spiroides*). Были выявлены 40 таксонов рангом ниже рода при наибольшем видовом богатстве рода *Dolichospermum*. Представители пяти таксонов потенциально токсичны и способны вызывать «цветение» субарктических водоемов. Массовое локальное развитие *Dolichospermum lemmermannii* сопровождается предельным упрощением трофических сетей и циклов биогенных элементов в экосистеме оз. Имандра из-за их быстрого оборота в системе «вода – цианопрокариоты» (Денисов, Кашулин, 2016). При отсутствии в составе зоопланктона активных потребителей *D. lemmermannii* быстрый лизис их колоний ведет к возвращению биогенных элементов в водоем в форме, доступной для организмов-фототрофов. Избыток этих элементов в воде создает потенциальную угрозу массового развития цианопрокариот и расширения зон «цветения» на другие участки акватории озера. Долговременной аккумуляции биогенных элементов в трофических сетях препятствует и деградация литоральных экосистем, изначально сформированных водными растениями — макрофитами и макрозообентосом, вследствие нарушения гидрологического режима и резких искусственных колебаний уровня воды в Имандре. Мероприятия по восстановлению сообществ макрофитов могут стать одним из путей биоремедиации экосистемы этого крупнейшего пресноводного водохранилища.

Палеоэкологические исследования водоемов на базе диатомового анализа

Анализ изменений пресноводных экосистем и разработка эффективных способов управления водными ресурсами невозможны без знаний исторической динамики водоемов и вклада климатической и антропогенной составляющих в трансформацию водных экосистем. В настоящее время в лаборатории активно развивается палеоэкологическое направление исследований субарктических водоемов на основе диатомового анализа, который представляет конкретный инструмент для реконструкции истории развития водоемов и ряда основных показателей качества вод (Ryanzhin et al., 2010; Hadley et al., 2013). Мурманская область — один из наиболее значимых регионов для палеоэкологических исследований. Во-первых, высокоширотное географическое положение и зависимость от арктических воздушных масс определяют особую

чувствительность водных экосистем к любым климатическим изменениям. Во-вторых, на территории сосредоточен мощный промышленный комплекс, оказывающий долговременное трансформирующее влияние на качество вод, включая трофическую и токсическую нагрузку. В-третьих, наличие множества разнотипных озер предоставляет возможность выбора широкого спектра объектов исследований в зависимости от поставленных задач.

Осознавая важность диатомового анализа для палеолимнологических реконструкций и по инициативе Л. Я. Каган (2012), в лаборатории создана аннотированная коллекция диатомовых водорослей разнотипных водных объектов Евро-Арктического региона. В настоящее время коллекция является частью Гербария ИППЭС КНЦ РАН (Боровичев, Исаева, 2015; Боровичев и др., 2018) и постоянно пополняется новыми образцами. Обширные массивы полученной информации потребовали создания специализированной базы данных «Водоросли Евро-Арктического региона» (БД ВЕАР), в основу которой положены результаты палеолимнологических исследований диатомовых комплексов озерных донных отложений (Денисов, Косова, 2017). Специалистами лаборатории усовершенствован метод подготовки проб для диатомового анализа, позволяющий получать диатомовый материал высокой чистоты (Косова и др., 2011) и проведены комплексные палеоэкологические исследования совместно с сотрудниками ГИ КНЦ РАН (Николаева и др., 2015, 2016, 2017) и ИБВВ РАН им. И. Д. Папанина (Генкал, Денисов, 2016; Denisov, Genkal, 2018).

Палеоклиматический диатомовый анализ донных отложений. Содержание створок диатомей в ДО – наиболее информативный показатель динамики и интенсивности продукционных процессов в водоемах. Исследованы диатомовые комплексы ДО разнотипных водоемов Мурманской области, расположенных в различных ландшафтах и испытывающих разнофакторную антропогенную нагрузку. Анализ современных накоплений ДО с датировками высокого разрешения (^{210}Pb , ^{137}Cs) выявил резкое увеличение обилия и продукционного потенциала организмов-автотрофов в субарктических пресных водах, начиная с 1850 г., в ответ на потепление климата арктической зоны по окончании малого ледникового периода. В некоторых водоемах на современном этапе продуктивность возросла до уровня, характерного для атлантического климатического оптимума. Современное потепление климата в Арктике подтверждается максимальной для исследованной колонки численностью диатомей в слоях ДО последних десятилетий (рис. 13а).

Методами стратиграфического анализа ДО (хемо- и биостратиграфия) исследованы малые озера на территории Мурманской области и Норвегии. Получены новые данные о трансформации природной среды и климата Евро-Арктического региона в голоцене, реконструировано историческое развитие водных экосистем в эту эпоху. В субатлантике отмечен положительный тренд численности диатомей до величин, характерных для атлантического климатического оптимума голоцена (рис. 13б).

Структура диатомовых комплексов ДО и их количественные показатели могут использоваться в качестве индикатора палеосейсмических событий в историческом прошлом (Николаева и др., 2017). Так, резкое сокращение числа створок диатомей с последующей сменой доминантных таксонов, зафиксированное в ДО в ответ на землетрясение в среднем голоцене, в дальнейшем было подтверждено данными литостратиграфического и палинологического анализов (Николаева и др., 2016).

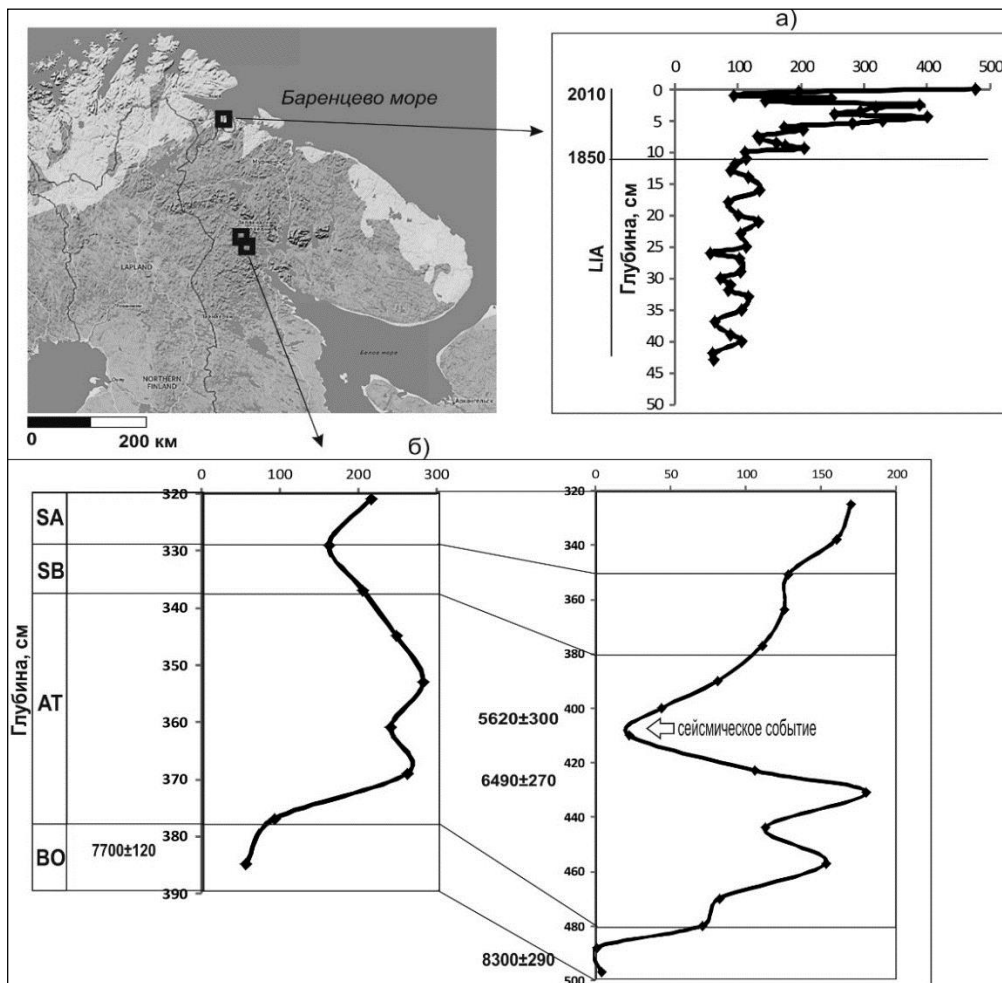


Рис. 13. Карта-схема расположения исследованных озер и историческая динамика содержания диатомей в ДО (млн./г сухого вещества):

а — современные отложения, датированные по ^{210}Pb и ^{137}Cs ;
 б — голоценовые отложения, датированные по ^{14}C .

Хронологические периоды голоцена: ВО — бореальный, АТ — атлантический, SB — суббореальный, SA — субатлантический; LIA — малый ледниковый

Палеолимнологическая реконструкция озера Имандра. Комплексы диатомовых водорослей озера характеризуются обилием центрических форм (Centrales): *Aulacoseira alpigena*, *Ellerbeckia arenaria*, *Cyclotella schumannii*, *C. radiosa*, *C. ocellata*, *C. bodanica*, *C. rossii*, *C. comensis*. Исследования этих комплексов позволили выделить четыре этапа в развитии водоема. Первый — в ходе малого ледникового периода — был наименее благоприятным для существования диатомей. Последующее потепление (второй этап) привело к увеличению общего обилия и видового разнообразия диатомей, формированию литоральных и бентосных альгоценозов, увеличению стока с водосбора, что, вероятно, способствовало подкислению озера болотными водами. Начало третьего этапа связано с изменением температурного режима водоема вслед за

потеплением климата, усилением минерализации вод в результате интенсификации эрозионных процессов на водосборе, трансформацией ряда гидрохимических параметров. Окончание этого этапа было вызвано промышленным загрязнением водоема и снижением рН вод из-за поступления кислотообразующих соединений. Четвертый, современный, этап характеризуется резким увеличением обилия диатомей после ввода в эксплуатацию Кольской АЭС. Наряду с измененным температурным режимом вследствие теплового загрязнения вод, интенсификация продукционных процессов водорослевых сообществ плеса Бабинская Имандра определяется трансформацией гидрологических и гидрохимических условий: изменением естественного хода водных течений при строительстве дамбы и поступлением биогенных элементов и загрязняющих веществ из плеса Йокостровская Имандра.

Ледниковые озера Хибинского горного массива. В диатомовых комплексах горных озер установлено доминирование видов: *Aulacoseira alpigena*, *A. pfaffiana*, *A. subarctica* и представителей родов *Brachysira* и *Frustulia*. Историческая динамика диатомовых сообществ в горных озерах характеризуется резкими колебаниями их численности, связанными с природными изменениями окружающей среды и климата. Диапазон колебаний сопоставим с мощным антропогенным воздействием. Вероятно, таким образом диатомовые сообщества реагировали на события малого ледникового периода XIV–XV в.в.

Динамика обилия диатомей малых горных водоемов с площадью водосбора < 4 км² отличается положительным трендом в направлении от нижних слоев донных отложений к верхним. Очевидно, это проявление олиготрофно-эвтрофной сукцессии, происходящей на фоне глобальных климатических изменений, которые благоприятствуют развитию водорослей (Косова, Денисов, 2017).

Таким образом, состав и структура водорослевых сообществ демонстрируют изменения в структурно-функциональной организации водных экосистем Евро-Арктического региона в глобальном масштабе. В последние годы действие антропогенных факторов, очевидно, было усилено изменениями регионального и глобального климата, что повлекло за собой резкие и кратковременные сезонных изменения, в частности, массовое развитие отдельных видов. В составе альгоценозов увеличилась доля цианопрокариот, включая и потенциально токсичные формы. В водоемах «фоновых» районов в настоящее время сохраняется типично «субарктический» облик альгофлоры, с некоторыми признаками повышения трофического статуса, что также может быть следствием динамики климатической системы в сторону потепления. Водорослевые сообщества региона изначально обладают мощным потенциалом к массовому развитию при благоприятных условиях, что успешно реализуется при появлении дополнительных факторов, таких как антропогенное эвтрофирование. Показатели состояния альгоценозов приобрели в настоящее время определяющее значение в системе биоиндикации, при оценке качества вод требуется учитывать синергетику нового комплекса факторов, действие которых неоднозначно и не всегда может быть оценено с помощью существующих общепринятых комплексных показателей.

Зоопланктонные сообщества

Субарктические озера относятся к водоемам планктонного типа: основные потоки органического вещества и энергии передаются от организмов-продуцентов на высшие трофические уровни через зоопланктонные сообщества простейших, коловраток и ракообразных. Являясь промежуточным трофическим звеном между бактерио- и фитопланктоном и рыбным населением, зоопланктон в значительной степени определяет ресурсный потенциал, кормовую базу и рыбопродуктивность водоемов.

Современные планктонные сообщества — результат длительного взаимодействия комплекса факторов, как многолетних изменений абиотической среды, так и структурно-функциональных перестроек и взаимоотношений между организмами внутри биологических сообществ. Для зоопланктона субарктических пресноводных экосистем характерно преобладание стенобионтных видов, требовательных к качеству вод, что обуславливает повышенную чувствительность сообществ и к антропогенным воздействиям. Комплексный многофакторный характер антропогенной нагрузки на крупные субарктические водоемы — озера Имандра и Куэтсьярви — существенно затрудняет выявление специфических показателей зоопланктона в качестве биоиндикаторов воздействия отдельных факторов (изменение климата, эвтрофирование, техногенное загрязнение и др.). Следовательно, актуальным становится поиск наиболее информативных показателей из числа типологических (Андроникова, 1996).

Зоопланктоценозы оз. Имандра на протяжении многих лет подвержены многофакторному антропогенному воздействию: загрязнению промышленными стоками горно-обогатительных предприятий и хозяйственно-бытовыми стоками (губы Монче и Белая), тепловому загрязнению подогретыми водами Кольской АЭС (губа Молочная). Восточный и западный участки плеса Бабинская Имандра, не испытывающие прямой техногенной нагрузки, считаются условно-фоновыми. Зоопланктонные сообщества перечисленных районов озера исследованы в летние периоды 1996–2013 гг. Отбор, обработка проб и необходимые расчеты выполнены по методикам гидробиологического мониторинга (Руководство ..., 1992).

Зоопланктон условно-фоновых районов озера Имандра. Зоопланктон озера по своей структуре сравнительно однороден и представлен видами, типичными для фауны северных широт. К характерным представителям, распространенным более или менее широко в разных участках акватории, относятся: коловратки (*Ascomorpha ecaudis*, *Asplanchna herrioki*, *A. priodonta*, *Bipalpus hudsoni*, *Collotheca pelagica*, *Conochilis unicornis*, *Filinia longiseta*, *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, *K. cochlearis macracantha*, *Notholca caudata*, *Ploesoma triacanthum*, *P. truncatum*, *Polyarthra minor*, *P. vulgaris*, *Synchaeta pectinata*, *S. stylata*, *Trichocerca porcellus*), ветвистоусые ракообразные (*Bosmina longirostris*, *B. obtusirostris*, *Bythotrephes cederstroemii*, *Daphnia cristata*, *D. longiremis*, *Holopedium gibberum*, *Leptodora kindtii*, *Ophryoxus gracilis*, *Polyphemus pediculus*), веслоногие ракообразные (*Eudiaptomus gracillius*, *Heterocope appendiculata*, *Acanthocyclops gigas*, *Cyclops vicinus*, *Mesocyclops leuckarti*).

По численности преобладают коловратки (*Keratella cochlearis*, *K. quadrata*, *Kellicottia longispina*, *Notholca caudata*), по биомассе — наиболее ценные в кормовом отношении ракообразные из отрядов Ветвистоусые (*Bosmina obtusirostris*, *Daphnia cristata*, *Holopedium gibberum*) и Веслоногие (*Mesocyclops leuckarti*, *Eudiaptomus gracilis*). Периодически обильно развиваются

чувствительные к загрязнению каланоидные рачки (*Calanoida*) *Eudiaptomus gracilis*, *Holopedium appendiculata*, принадлежащие к эколого-трофической группе активных «грубых» фильтраторов и играющие значительную роль в процессе очищения воды (табл. 1).

Таблица 1

Доминирующие виды зоопланктона и трофический статус условно-фоновых и загрязненных районов озера Имандра в многолетнем ряду наблюдений

Период исследования	Трофический статус водоема	Доминирующий вид зоопланктона
Условно-фоновый район		
июль 1996 г.	олиготрофный	<i>Bosmina obtusirostris</i>
июль 1998 г.	олиготрофный	<i>Kellicottia longispina</i>
Август 2003 г.	олиготрофный	<i>Keratella cochlearis</i>
Август 2006 г.	олиготрофный	<i>Keratella quadrata</i>
июль–август 2011 г.	олиготрофный	<i>Notholca caudata</i>
Губа Белая		
июль 1996 г.	β-мезотрофный	<i>Notholca caudata</i> <i>Keratella cochlearis</i> <i>Keratella hiemalis</i>
июль 1998 г.	β-мезотрофный	<i>Asplanchna priodonta</i> <i>Keratella quadrata</i> <i>Notholca caudata</i>
август 2001 г.	олиготрофный	<i>Bipalpus hudsoni</i> <i>Synchaeta</i> sp. <i>Bosmina obtusirostris</i> <i>Mesocyclops leuckarti</i>
август 2003 г.	олиготрофный	<i>Asplanchna priodonta</i> <i>Synchaeta</i> sp.
август 2006 г.	олиготрофный	<i>Asplanchna priodonta</i> <i>Synchaeta</i> sp.
июль–август 2011 г.	α-эвтрофный	<i>Synchaeta</i> sp. <i>Keratella cochlearis</i> <i>Polyarthra</i> sp.
июль–август 2012 г.	α-мезотрофный	<i>Keratella cochlearis</i> <i>Polyarthra</i> sp. <i>Brachionus calyciflorus</i>

Показатели общей численности и биомассы зоопланктона условно-фоновых районов оз. Имандра составляют в среднем $68,7 \pm 44,1$ тыс. экз./м³ и $0,4 \pm 0,2$ г/м³ соответственно. Диапазон колебаний средней индивидуальной массы организмов-зоопланктеров (0,006–0,021 мг) соответствует данным для других водоемов Мурманской области (Кашулин и др., 2005, 2008). Индекс видового разнообразия, рассчитанный по формуле Шеннона, невысок и варьирует в разные годы в пределах 1,7–2,9 бит/экз. (табл. 2). Воды оз. Имандра характеризуются низкой трофностью, определяя олиготрофный статус водоема (табл. 1).

В многолетней динамике состав доминирующего комплекса зоопланктона плеса Бабинская Имандра претерпевал изменения: в 1960 году он имел черты коловраточно-клагоцерного типа, в 1973 — коловраточного, с 1981 по 1987 гг. — коловраточного-копеподного (табл. 3). В 1993-1998 гг. в составе руководящего комплекса организмов (с долей > 20% от общей численности) наряду с коловратками преобладали рачки копеподы и клadoцеры, в 2003–2006 гг. доминировала «мирная» коловратка *Polyarthra* sp., в 2013 году ей сопутствовала коловратка *Keratella cochlearis*, в эти же периоды обильно встречались мирные (*Bipalpus hudsoni*, *Brachionus calyciflorus*) и хищная (*Asplanchna priodonta*) коловратки и хищные циклопы. Таким образом, к настоящему времени зоопланктон условно-фоновый района оз. Имандра вновь приобрел черты коловраточного типа. Основу руководящего комплекса организмов составляют типичные виды субарктических водоемов.

Таблица 2

Количественные показатели зоопланктонных сообществ условно-фоновый и загрязненных районов озера Имандра

Район / Показатель*	Численность, тыс. экз./м ³		Биомасса, г/м ³		Индекс разнообразия по Шеннону, бит/экз.	
Условно-фоновый район	68.7 ± 44.1^a 7.8 – 230.1 ^b	49.1 ^c	0.4 ± 0.2 0.2 – 0.6	0.2	2.0 ± 0.5 1.7 – 2.9	0.5
Губа Монче	627.2 ± 215.5 66.9 – 1629.3	609.6	1.8 ± 0.3 0.6 – 3.4	1.0	2.2 ± 0.1 1.9 – 3.0	0.3
Губа Белая	401.5 ± 140.1 14.5 – 1064.5	190.1	2.2 ± 0.9 0.2 – 7.1	1.6	2.1 ± 0.2 1.1 – 2.9	0.6
Губа Молочная	99.1 ± 54.4 17.0 – 312.0	121.7	0.6 ± 0.1 0.2 – 1.1	0.3	2.5 ± 0.2 1.9 – 2.9	0.4

Примечание. ^aСреднее значение и стандартная ошибка ($M \pm m$), ^bразброс значений ($\min - \max$), ^cстандартное отклонение ($std. dev.$). *Период исследований: июль-август 1996, 1998, 2003, 2006, 2011, 2012, 2013 гг.

Зоопланктон в зоне промышленных и хозяйственно-бытовых стоков. Для губы Белой характерны резкие колебания численности и биомассы зоопланктона и изменение его видового состава. В разные периоды исследований в сообществе преобладали коловратки (хищная *Asplanchna priodonta*, мирные *Brachionus calyciflorus*, *Bipalpus hudsoni*, *Keratella cochlearis*, *K. hiemalis*, *K. quadrata*, *Notholca caudata*, *Polyarthra* sp., *Synchaeta* sp.), хищный веслоногий рачок *Mesocyclops leuckarti* и ветвистусый рачок-фильтратор *Bosmina obtusirostris* (табл. 1). Встречались виды, не отмеченные в водах условно-фоновый района: коловратки *Euchlanis dilatata*, *Filinia longiseta*, *Ploesoma* sp., *Synchaeta* sp., *Trichocerca* sp., *Trichotria* sp.; клadoцеры *Alonopsis elongata*, *Chydorus globosus*, *Daphnia* sp.; копепода *Acanthocyclops vernalis*. Число видов варьировало от 8 до 16 против 27 в условно-фоновый районе. В наиболее нарушенных участках акватории коловратки доминировали на фоне исчезновения каланоидных рачков, что характерно и для других северных озер, загрязняемых стоками горнорудных производств (Кухарев и др., 1998). Чувствительные к загрязнению активные

«грубые» фильтраторы-каланоиды *Eudiaptomus graciloides* и *Heterocope appendiculata*, отсеживающие из воды крупные органические взвеси, были единичны или отсутствовали, что свидетельствовало о снижении биофильтрационной активности зоопланктона. Мирные формы зоопланктона преобладали над хищными.

Таблица 3

Состав доминирующего комплекса летнего зоопланктона плеса Бабинская
Имандра в многолетнем ряду исследований

Период исследований	Вид		Источник данных
1960	<i>Kellicottia longispina</i> <i>Synchaeta</i> sp. <i>Bosmina</i> sp. <i>Holopedium gibberum</i>		Петровская (1966)
1973	<i>Kellicottia longispina</i> <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Conochilus unicornis</i> <i>Collotheca pelagica</i>		Деньгина (1980)
1981–1987	<i>Kellicottia longispina</i> <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Conochilus unicornis</i> <i>Mesocyclops leuckarti</i>		Моисеенко, Яковлев (1990)
1993–1998	Доминанты (> 20 % от общей численности): <i>Kellicottia longispina</i> <i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Bosmina obtusirostris</i> <i>Keratella cochlearis</i> Обильные виды (> 10% общей численности) <i>Cyclops scutifer</i> <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Bipalpus hudsoni</i>		Вандыш и др. (2014)
2003–2006	Доминант: Обильные виды:	<i>Polyarthra</i> sp. <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Cyclopos</i> sp. <i>Bipalpus hudsoni</i> <i>Keratella cochlearis</i>	
2013	Доминанты: Обильные виды:	<i>Polyarthra</i> sp. <i>Keratella cochlearis</i> <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Cyclopos</i> sp. <i>Brachionus calyciflorus</i>	

Обильное развитие коловраток в зоне сброса сточных вод определяется несколькими факторами: повышенной устойчивостью этих микроскопических беспозвоночных к токсикантам, меньшей, по сравнению с ракообразными, чувствительностью к высоким концентрациям неорганических взвесей в воде (благодаря смешанному типу питания и ряду адаптивных механизмов, например — способности образовывать цисты), слабым выеданием со стороны хищников (Телеш, 1996; Gliwicz, 1969; Malley et al., 1982; Brezonik et al., 1984).

Ряд авторов связывают перестройки в планктонных сообществах загрязненных водоемов не с ухудшением трофических условий, а с различной чувствительностью беспозвоночных к отходам горнорудного производства (Кухарев и др. 1998; Калинкина, Куликова, 2005, 2009). Эврибионтные виды рачков-клядоцер и коловраток родов *Bosmina*, *Asplanchna*, *Keratella* более толерантны к минеральному загрязнению и выживают в воде с повышенными концентрациями неорганических веществ. Среди массовых видов планктона выделены три группы по степени толерантности к нарушению ионного состава воды: с низкой (*Holopedium gibberum*, *Leptodora kindtii*, *Polyphemus pediculus*, *Bosmina longimanus*, *Eudiaptomus gracilis*, *Heterocope appendiculata*), средней (*Thermocyclops oithonoides*, *Mesocyclops leuckarti*, *Daphnia cristata*, *Bosmina obtusirostris*, *Kellicottia longispina*) и высокой толерантностью (*Daphnia longispina*, *Vipalpus hudsoni* и др.).

Значения общей численности и биомассы зоопланктона в губе Белой более чем в 5 раз превышали таковые в условно-фоновом районе оз. Имандра, индекс видового разнообразия Шеннона варьировал в более широких пределах в связи с повышением степени доминирования видов коловраток, устойчивых к воздействию токсикантов (табл. 2). Показатель средней индивидуальной массы зоопланктонов (0,001–0,018 мг) отражал преобладание в сообществе мелкоразмерных представителей.

Зоопланктон в зоне воздействия Кольской АЭС. Подогреваемая акватория оз. Имандра – губа Молочная, несмотря на проявления процесса эвтрофирования, по показателям численности и биомассы зоопланктона сохраняет черты олиготрофного водоема (табл. 1, 2). Это подтверждает выводы ряда исследователей о положительном влиянии умеренно подогреваемых вод, сбрасываемых электростанциями, на биоту субарктических водоемов (Мордохай-Болтовской, 1975; Никольский, 1979; Сергеева, 1988). К негативным последствиям относятся случаи гибели и травмирования крупных и/или имеющих морфологические выросты ракообразных (*Daphnia*, *Bosmina*, *Cyclops*, *Leptodora*, *Bythotrephes*) при их прохождении через охлаждающую систему АЭС. Отрицательно влияет на планктон и сложная гидродинамическая ситуация в устье сбросного канала и в подогреваемой зоне озера, обусловленная высокой скоростью перемешивания и проточностью водных масс.

Закономерности трансформации зоопланктонных сообществ загрязняемых вод озера Имандра. В загрязненных участках акватории озера структурные перестройки зоопланктона проявляются в снижении, а в ряде случаев, в исчезновении наиболее чувствительных к условиям среды видов-реликтов и типичных представителей фауны олиготрофных озер (*Leptodora kindtii*, *Bythotrephes longimanus*, *Eudiaptomus gracilis*, *Heterocope appendiculata*). Их замещают эврибионтные виды с простыми жизненными циклами и высокой скоростью размножения, которые в итоге формируют руководящий комплекс

зоопланктоценоза: коловратки *Asplanchna priodonta*, *Keratella quadrata*, *Kellicottia longispina* — типичные представители северного ротаторного планктонного комплекса. Преобладание коловраток над ракообразными-фильтраторами свидетельствует об ухудшении самоочистительной способности вод в загрязняемых районах озера.

По мере удаления от антропогенных источников нарастает число типичных для субарктических водоемов эвритопных видов с широкой экологической валентностью, являющихся ценным кормовым ресурсом: «тонких» фильтраторов — рачков-клагоцер (*Bosmina obtusirostris*, *Daphnia* spp.) и активных «грубых» фильтраторов — рачков-копепод (*Eudiaptomus gracilis*, *Heterocope appendiculata*). Таким образом, таксономическая структура зоопланктона является хорошим индикатором загрязнения водоема в целом или его отдельных участков.

Количественные показатели зоопланктона проявляют специфику в зависимости от степени техногенного загрязнения вод. Несмотря на снижение уровня антропогенной нагрузки после 1990 года, максимальные значения численности и биомассы зоопланктона зарегистрированы в районе сброса хозяйственно-бытовых вод и отходов апатитнефелиновой промышленности (губы Монче и Белая). Ведущим фактором здесь выступает эвтрофирование: высокое содержание биогенных элементов и органического вещества в воде снижает токсичность тяжелых металлов и других поллютантов и стимулирует развитие беспозвоночных.

Зоопланктон озера Куэтсъярви. В составе зоопланктона оз. Куэтсъярви, исследованного в 1993-2012 гг., в разные периоды доминировали коловратки *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, *K. quadrata*, *Notholca* sp., *Polyarthra* sp. и ветвистусые рачки-фильтраторы *Bosmina obtusirostris* и *Daphnia cristata*. Коловратки преобладали по численности, ветвистусые — по биомассе. Среди ракообразных кладоцеры количественно превалировали над веслоногими, мирные формы над хищными. Индекс Шенонна оценивался в 1,7–2,6 бит/экз. По типу трофности этот крупный пресноводный водоем охарактеризован как переходный от α - к β -олиготрофному (Китаев, 1984).

Показатели общей численности и биомассы варьировали по годам в пределах 36,5–147,0 тыс. экз./м³ и 0,09–0,7 г/м³; наибольшие в многолетней динамике значения были зарегистрированы в июле 2012 года. Это объясняется как сроками отбора проб (июль – месяц наибольшей активности зоопланктона) и обилием доступной пищи (численность водорослей достигала 343,1 млн. экз/м³, биомасса — 1,37 г/м³), так и повышенной концентрацией в озерной воде азотсодержащих соединений (общее содержание азота находилось в пределах 272,0–305,0 мкг/л). Таким образом, комплексное воздействие природных и антропогенных факторов привело к повышению трофического статуса этого крупного субарктического водоема.

Бентосные сообщества

Комплекс бентосных (донных) беспозвоночных является важным функциональным компонентом водных экосистем. Его представители участвуют в биогеохимическом круговороте элементов (кальция, кремния и др. биогенов, тяжелых металлов), в процессах трансформации органического вещества в системе «толща воды — донные отложения», в регуляции механического состава грунтов и газового режима водных объектов, в процессах самоочищения

вод (Макрушин, 1984; Балушкина, 1987; Методы ..., 1989; Руководство по методам ..., 1992; Шитиков и др., 2003).

Мурманская область является северным пределом распространения многих видов, однако в целом макрозообентос местных водоемов качественно богат и включает практически все систематические группы, представленные в пресных водах Палеарктики. Бентосная и нектобентосная фауны области насчитывают около 500 видов беспозвоночных. Основу зообентоса составляют виды европейского, европейско-сибирского и палеарктического распространения при незначительной доле космополитов (11 видов) (Яковлев, 2005).

Изучение зообентоса Мурманской области на примере крупных озер — Имандры и Умбозера началось в 1925-1930 гг. (Крогиус, 1931). В дальнейшем эти работы носили эпизодический характер и выполнялись на отдельных плесах (Дольник, Стальмакова, 1975). Систематические гидробиологические исследования оз. Имандра получили развитие в конце 1980-х гг. на базе ИППЭС КНЦ РАН (Моисеенко, Яковлев, 1990; Яковлев, 1991, 1995, 1998а,б, 1999, 2002, 2005; Антропогенные..., 2002).

Современные тенденции изменения бентосных сообществ субарктических водоемов на примере озера Имандра. В последние годы в сообществах фоновых водоемов отмечается сокращение биоразнообразия и роли аборигенных видов, с одной стороны, и внедрение и расселение эврибионтных видов из умеренных широт, с другой. Вселенцы оккупируют преимущественно мелководные участки; в зоне профундали (на глубинах более 10 м) бентосные сообщества более стабильны и в меньшей степени подвержены изменениям и инвазиям (Яковлев, 2005).

За период 2011–2016 гг. в составе бентосной фауны оз. Имандра выявлено более 80 видов беспозвоночных, принадлежащих к 15 таксонам: кишечнополостные (Hydroida), круглые черви (Nematoda), олигохеты (Oligochaeta), пиявки (Hirudinea), двустворчатые моллюски (Bivalvia), брюхоногие моллюски (Gastropoda), водяные клещи (Hydracarina), ракообразные (Crustacea), хирономиды (Chironomidae), двукрылые (Diptera), жесткокрылые (Coleoptera), полужесткокрылые (Hemiptera), ручейники (Trichoptera), поденки (Ephemeroptera), веснянки (Plecoptera). Зарегистрированы новые для водоема виды: водяной ослик *Asellus aquaticus* из отряда равноногих раков (Isopoda) и двустворчатый моллюск из рода беззубок *Anodonta* (семейство Unionidae).

Водяной ослик широко распространен в Европе, включая страны Скандинавии. Северный предел распространения этого гидробионта ограничен подзоной северотаежных лесов. Он обычен в лесных озерах северной Финляндии, в центральных и западных районах Норвегии (Økland, 1979). В Мурманской области ранее встречен только в южных и юго-западных районах: Ковдорском (на границе с Финляндией) и в оз. Сенное (в 25 км юго-западнее Кандалакши) (Петров, Стругач, 1966). В 2015 году популяция *Asellus aquaticus* впервые была обнаружена в оз. Имандра на литорали Тик-губы.

Крупные двустворчатые моллюски рода *Anodonta* распространены в Средней и Северной Европе, Европейской части России и Западной Сибири. Сведения о беззубках в водоемах Мурманской области ранее отсутствовали. В 2011 году популяция *Anodonta* sp. была выявлена в подогреваемых водах в районе водоотводящего канала Кольской АЭС. В оз. Имандра моллюск, вероятно, был занесен случайным образом с рыбопосадочным материалом из садкового форелевого хозяйства, расположенного рядом с водоотводящим

каналом. Раковины *Anodonta sp.* найдены в бентосных пробах не только в районе канала электростанции, но и на побережьях островов в Бабинской и Йокостровской Имандре, что косвенно указывает на распространение моллюска по акватории озера.

Термофикация. Влияние теплового загрязнения в целом для оз. Имандра выражено незначительно. Импактная зона теплового загрязнения от Кольской АЭС ограничена акваторией губы Молочная. Структура зообентоса наиболее изменена в водоотводящем канале и приустьевом участке, где состав и количественные показатели бентоса значительно отличаются от участков озера с естественным температурным режимом. К настоящему времени в водоотводящем канале сформировались литореофильные бентосные сообщества, представленные 32 видами беспозвоночных. В бентосе канала доминируют хирономиды родов *Monodiamesa*, *Cricotopus* и *Procladius* (*Monodiamesa bathyphila*, *Polypedilum* gr. *scalaenum*, *Potthastia* sp. и др.), их общая доля составляет в среднем 55 %. Субдоминируют брюхоногие моллюски и малощетинковые черви — олигохеты.

В глубоководной зоне губы Молочная основу бентоса формируют холодноводные стенотермные рачки-бокоплавы *Monoporeia affinis* и моллюски рода *Euglesa*; в составе хирономидных комплексов преобладают представители подсемейства Tanipodinae. С увеличением глубины и удалением от устья отводящего канала возрастает доля холодноводных оксифильных личинок хирономид из подсемейства Orthoclaadiinae.

За пределами губы Молочная изменений в составе и структуре зообентоса не наблюдается: в глубоководных биоценозах также доминируют амфиподы *M. affinis*. По составу зообентоса исследованная акватория относится к олиготрофному типу.

Токсификация. Загрязнение оз. Имандра стоками медно-никелевого производства – основной фактор, нарушающий структурно-функциональную организацию бентосных сообществ в районе губы Монче. В верхней части губы выражена деградация донных биоценозов. В направлении выхода из губы разнообразие и количественные показатели зообентоса возрастают, однако структура сообществ остается монодоминантной с преобладанием хирономид рода *Chironomus*, которое в менее загрязненных участках сменяется доминированием амфиподы *M. affinis*. Трофический статус вод исследованной акватории оценивается как олиготрофный, что обусловлено токсическим загрязнением стоками комбината «Североникель», способствующими «олиготрофизации»: снижению таксономического разнообразия донной фауны и формированию монодоминантной структуры с преобладанием хирономид.

Эвтрофирование. По показателям зообентоса эвтрофный трофический статус вод характерен для губы Белая. В составе макрозообентоса доминируют малощетинковые черви-грунтофаги из семейства Tubificidae, устойчивые к загрязнению минеральными взвешивами. В последнее время наблюдается тенденция снижения общей численности макрозообентоса, обусловленная сокращением плотности олигохет. Отмечено появление в акватории хирономид подсемейства Orthoclaadiinae и бокоплава *M. affinis*.

Зообентос озера Куэтсьярви. В водоеме, подверженном влиянию промышленных стоков комбината цветной металлургии «Печенганикель», бентосные сообщества глубоководной зоны бедны по таксономическому составу, их формируют хирономиды, малощетинковые черви-олигохеты и двусторчатые

моллюски рода *Euglesa*. Количественные показатели невысоки: численность бентоса составляет в среднем около 500 экз/м², биомасса — около 2 г/м² при значительном варьировании обоих показателей как по пробам, так и по участкам водоема: от 70 до 1660 экз/м² и от 0,3 до 6,8 г/м².

Во всех исследованных участках оз. Куэтсьярви в составе макрозообентоса преобладают хирономиды (30–70 % от общего количества донных беспозвоночных). Выявлено 18 видов, среди которых обычные обитатели загрязненных озер — представители родов *Procladius*, *Cricotopus* и *Chironomus* формируют основу хирономидных сообществ (табл. 4). В литоральной зоне отмечено 9 видов при доминировании типичного обитателя загрязненных водотоков *Cricotopus silvestris* gr. (Orthoclaadiinae) и хищной хирономиды *Procladius (Holotanypus) choreus* gr. (Tanypodinae). В глубоководной зоне озера зарегистрированы 13 видов. Более 70 % общей численности хирономид приходится на долю трех доминантов: *Sergentia coracina* — холодноводного вида, широко распространенного в глубоководных озерах Мурманской области, и видов *Chironomus cingulatus* Meigen и *Prodiamesa olivacea* Meigen, устойчивых к загрязнению вод тяжелыми металлами.

Таблица 4

Видовой состав хирономид озера Куэтсьярви

Вид / Зона	Литораль	Профундаль
1 <i>Cricotopus silvestris</i> gr. (Orthoclaadiinae)	+	–
2 <i>Cricotopus</i> sp. (Orthoclaadiinae)	+	–
3 <i>Cryptochironomus defectus</i> gr. (Chironominae)	+	–
4 <i>Glyptotendipes</i> sp. (Chironominae)	+	–
5 <i>Psectrocladius</i> sp. (Orthoclaadiinae)	+	–
6 <i>Orthoclaadiinae</i> sp. (Orthoclaadiinae)	+	+
7 <i>Polypedilum</i> sp. (Chironominae)	+	+
8 <i>Procladius (Holotanypus) choreus</i> gr. (Tanypodinae)	+	+
9 <i>Protanypus caudatus</i> (Diamesinae)	+	+
10 <i>Chironomus cingulatus</i> (Chironominae)	–	+
11 <i>Chironomus</i> sp. (Chironominae)	–	+
12 <i>Lappodiamesa</i> sp. (Chironominae)	–	+
13 <i>Macropelopia</i> sp. (Tanypodinae)	–	+
14 <i>Monodiamesa batyphila</i> (Diamesinae)	–	+
15 <i>Polypedilum (Pentapedilum) exsectum</i> (Chironominae)	–	+
16 <i>Prodiamesa olivacea</i> (Diamesinae)	–	+
17 <i>Sergentia coracina</i> gr. (Chironominae)	–	+
18 <i>Stictochironomus</i> sp. (Chironominae)	–	+
Всего видов	9	13

Хирономидные комплексы горных озер. Исследованы видовой состав, количественные показатели и структура хирономидных комплексов в водоемах Хибинского горного массива, расположенных в различных горно-растительных поясах. В составе донной фауны профундали хирономиды формируют до 60–95 % обилия макрозообентоса. Выявлены представители 27 таксонов. Для водоемов горно-лесного пояса характерны относительно высокие показатели видового

разнообразия и обилия и олигодоминантная структура хирономидных комплексов. Доминирование конкретных видов определяется совокупностью морфометрических и гидрохимических характеристик водоемов: в глубоководных озерах преобладают холодолюбивые олиготрофные личинки *Sergentia coracina* (Chironominae); в мелководных, хорошо прогреваемых водоемах с развитой водной растительностью доминируют эвтрофные личинки *Corinocera ambigua* и *Microtendipes* sp. Антропогенное влияние трансформирует олигодоминантную структуру хирономидных комплексов в монодоминантную с преобладанием эврибионтных личинок рода *Chironomus*.

В водоемах горно-лесотундрового пояса и горной тундры видовое разнообразие и обилие хирономид снижаются, возрастает доля холодноводных личинок из подсемейств Orthoclaadiinae (*Orthocladius* sp., *Cricotopus algarum* gr., *Cricotopus* sp., *Protanypus caudatus*), Prodiamesinae (*Monodiamesa batyphila*) и Tanypodinae (*Procladius choreus* gr., *Macropelopia* sp.). В профундали высокогорных водоемов (> 800 м над уровнем моря) формируются монодоминантные сообщества из широко распространенных в Палеарктике хирономид рода *Procladius*, предпочитающих холодные олиготрофные воды.

Рыбное население

Среди гидробионтов рыбы являются наиболее предпочтительными индикаторами любых изменений качества среды (Немова, Высоцкая, 2004; Adams, Ryon, 1994; Whitfield, Elliott, 2002; Sonesten, 2003; Martinez-Haro et al., 2015). К основным факторам, угрожающим арктической фауне рыб, в настоящее время относятся: сохраняющаяся техногенная нагрузка, поступление в водоемы загрязняющих веществ, накопленных на территории водосборов, трансформация водных объектов для целей гидроэнергетического комплекса, усиление процессов антропогенного эвтрофирования вод, инвазии новых видов гидробионтов, трансформации в структуре сообществ (Кашулин и др., 1999, 2011, 2012; Антропогенные ..., 2002; АМАР, 2005; Dauvalter et al., 2011).

Изменения на организменном уровне. Токсическое действие тяжелых металлов и патологии внутренних органов. Основным источником загрязнения тяжелыми металлами для водоемов приграничного района России, Норвегии и Финляндии остается металлургический комбинат «Печенганикель» (Печенгская площадка АО «Кольская ГМК»). Серьезные трансформации на уровне отдельных организмов, популяций и сообществ рыб в ответ на интенсивное загрязнение и высокую токсичность воды были зарегистрированы в водоемах этого района еще несколько десятилетий назад (Лукин, 1995; Моисеенко, 2002; Кашулин, 2004; Терентьев, 2005). В настоящее время состояние ихтиофауны остается без значительных улучшений. Регистрируется интенсивное развитие патологий внутренних органов, что свидетельствует о сохраняющейся нагрузке тяжелых металлов на водные экосистемы.

В первую очередь это касается никеля, провоцирующего развитие болезней почек. Частота патологий этого органа достигает в выборках рыб 46 %. Широко распространены соединительно-тканые разрастания почек, у 13 % рыб выражена почечнокаменная болезнь. В наиболее загрязняемом водоеме — оз. Куэтсьярви — доля практически здоровых (по состоянию почек) особей в уловах не превышает 30 %. Серьезные поражения печени зарегистрированы почти у 70 % сигов. Частота патологий рыб сохраняется на высоком уровне как в близко расположенных, так и в наиболее удаленных от источника загрязнения водоемах (рис. 14).

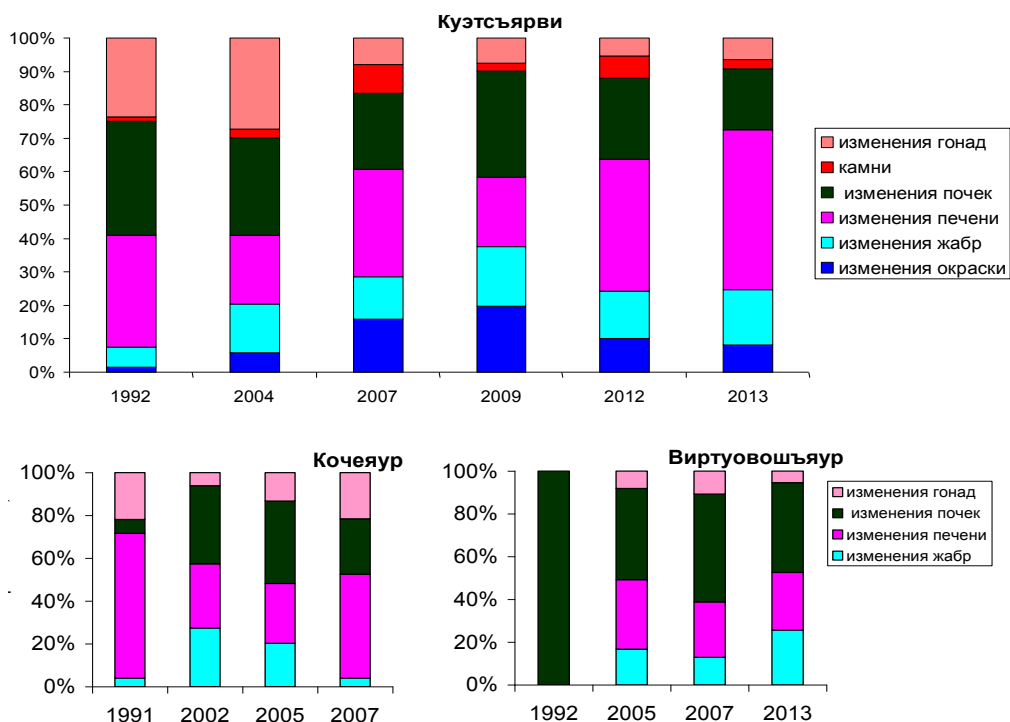


Рис. 14. Изменение частоты патологий внутренних органов сига в озерах Куэтсьярви, Кочеяур и Виртуовошьяур в зоне влияния металлургического предприятия «Печенганикель» в многолетнем ряду наблюдений

Патологические трансформации внутренних органов рыб, отмечаемые в озерах приграничного района, связаны, прежде всего, с действием Ni. Накопление этого металла в организмах сигов напрямую зависит от удаления водоема от предприятия «Печенганикель» (Amundsen et al., 2011; Kashulin et al., 2011). Частота патологий печени и почек сигов достоверно скоррелирована со степенью загрязнения ДО исследованных водоемов: $r = 0,85-0,90$ (рис. 15).

Поступление тяжелых металлов в организм сигов связано с их бентосным типом питания. Повышенные концентрации металлов, поступающих в организм с пищей, оказывают патологическое действие именно на печень и почки. Таким образом, патологии внутренних органов рыб-бентофгов явно свидетельствуют о загрязнении территории водосборов и донных отложений тяжелыми металлами, а также об их токсическом влиянии на организм рыб.

Накопление ртути. На фоне хронического загрязнения выбросами промышленных предприятий (тяжелыми металлами и соединениями серы) все более актуальной для пресноводных экосистем высоких широт становится проблема глобального загрязнения атмосферы токсичными веществами и их трансграничного переноса. Так, в озерах Мурманской области и сопредельных регионах в организмах рыб отмечено накопление ртути в концентрациях, превышающих отечественные нормативы ПДК (0,5 мкг/г сырого веса, что соответствует величине ~2,3 мкг/г сухого веса) (рис. 16). Европейские нормативы более жесткие, в частности в Финляндии эта величина соответствует 1 мкг/г

сухого веса (Munthe et al., 2007). Аккумуляция этого токсичного металла характерна для хищных рыб, образующие верхние уровни трофических сетей (кумжа, щука), так и представителей со смешанным типом питания (окунь) и видов бентофаги (малотычинковый сиг) и планктонофаги (среднетычинковый сиг).

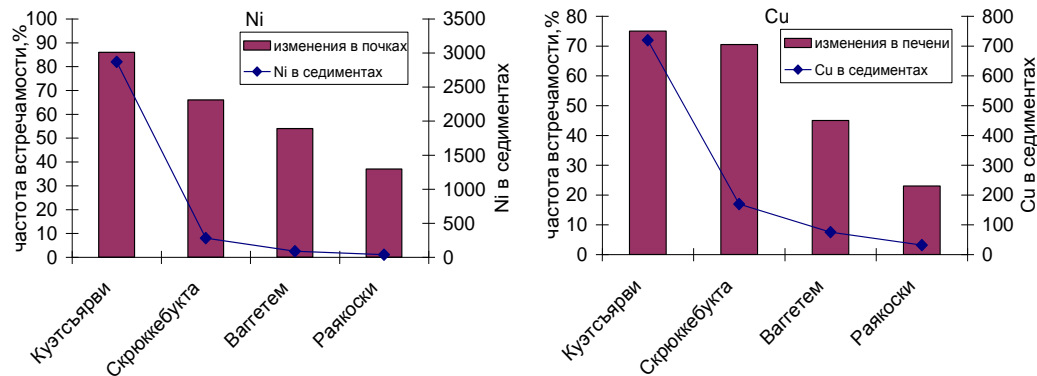


Рис. 15. Зависимость частоты патологий печени и почек в сигах (в % от числа рыб в выборке) от содержания никеля и меди в донных отложениях (в мкг/г сухого веса)

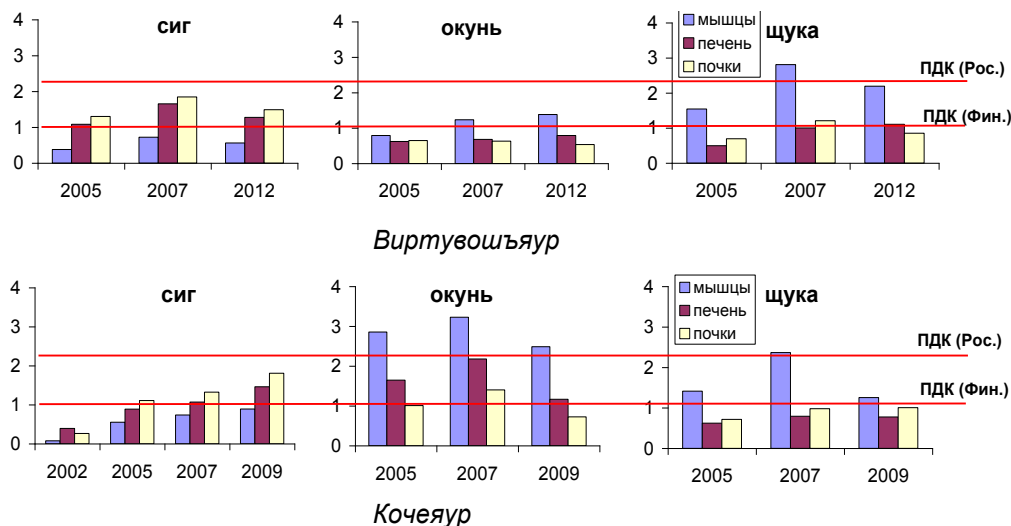


Рис. 16. Динамика уровней накопления ртути в тканях и органах бентофагов (сиг), хищников (щука) и рыб со смешанным типом питания (окунь) в озерах Печенгского района (в мкг/г сухого веса).

Результаты мониторинга демонстрируют устойчивый тренд к росту концентраций Hg в тканях и органах рыб на протяжении последних десятилетий. При этом содержание металла в организмах рыб не зависит от нагрузки со стороны локальных источников загрязнения: оно может быть минимальным в озерах вблизи предприятий и достигать наиболее высоких значений у рыб

малых озер, расположенных на значительном удалении от промышленных предприятий. Отмеченные пространственные и временные особенности накопления ртути в организмах рыб разнотипных водоемов Фенноскандии подтверждают статус этого металла как элемента глобального загрязнения атмосферы.

Следует отметить, что в озерах приграничного района России, Норвегии и Финляндии в условиях интенсивного промышленного загрязнения водоемов и на фоне отсутствия улучшения состояния популяций рыб, в целом, отмечено увеличение размерно-весовых показателей отдельных видов рыб и снижение частоты и интенсивности тяжелых патологических трансформаций, регистрируемых ранее. Эти изменения могут свидетельствовать о тенденциях восстановления водных экосистем.

Структурно-функциональные перестройки в популяциях и сообществах

Внутривидовая дифференциация сига. Низкое видовое разнообразие рыб внутренних водоемов Евро-Арктического региона компенсируется образованием внутривидовых симпатрических форм, занимающих разные экологические ниши, что позволяет более эффективно использовать доступные ресурсы. Сиг *Coregonus lavaterus* в крупных субарктических водоемах образует две морфо-экологические формы с разным типом питания: малотычинковую (бентофаги, обитают в литоральной и профундальной зонах) и среднетычинковую (пелагические планктонофаги). В малых озерах без участков выраженной пелагиали среднетычинковая форма сига не обитает. В акватории крупного субарктического оз. Имандра малотычинковая форма–бентофаг распространена повсеместно. Обитание среднетычинковой формы–планктофага приурочено к северной и центральной частям озера с высокими показателями биомассы зоопланктона, что обусловлено комплексным влиянием антропогенных и климатических факторов, усиливающим процесс эвтрофирования воды (Зубова и др., 2016).

Показано, что темпы прироста популяции малотычинковых сига в акватории оз. Имандра повышаются в направлении с юга на север и зависят от антропогенно обусловленного роста трофического статуса плесов – увеличения содержания биогенных элементов и биомассы зоопланктона. Наиболее отчетливо различия в приросте проявляются у сига первого года жизни. Более высокие темпы роста сига в центральной и северной частях озера позволяют им быстрее достичь размеров, оптимальных для нереста, и, следовательно, приводят к более раннему половому созреванию рыб по сравнению с южным плесом озера. В период полового созревания интенсивность роста сига изменяется незначительно и замедляется в постгенеративном возрасте.

Трансформация внутривидовой структуры сига, направленная на образование в пределах морфо-экологической формы малотычинкового сига двух размерных групп – крупной и карликовой, отмечена и в водоемах бассейна реки Пасвик, испытывающих долговременную и высокую токсическую нагрузку.

Инвазии, межвидовая конкуренция и трансформация рыбного населения. Рыбное население водоемов арктической зоны в настоящее время характеризуется существенными перестройками: ускорением темпов естественной сукцессии, критическим снижением численности стенобионтных длиннопериодических осенненерестующих лососевых и сиговых видов рыб и их замещением эврибионтными короткоцикловыми, весенненерестующими видами с малой промысловой ценностью – окуневыми, корюшковыми, карповыми. Как правило, эврибионтные виды более приспособлены к современным условиям среды —

изменению климата и гидрологического режима, загрязнению и эвтрофикации вод, а короткий цикл развития в условиях низкой конкуренции за кормовые ресурсы позволят им быстро наращивать численность и экспансивно расширять ареал за счет саморасселения. В настоящее время в оз. Имандра практически полностью утрачены нерестилища гольца, что привело к критическому сокращению его популяции. Значительно сократились популяции сига и кумжи (рис. 17) (Даувальтер, Терентьев, 2018). Скорости протекания указанных изменений носят сложный характер (Кашулин и др., 2012; Терентьев, Кашулин, 2012).

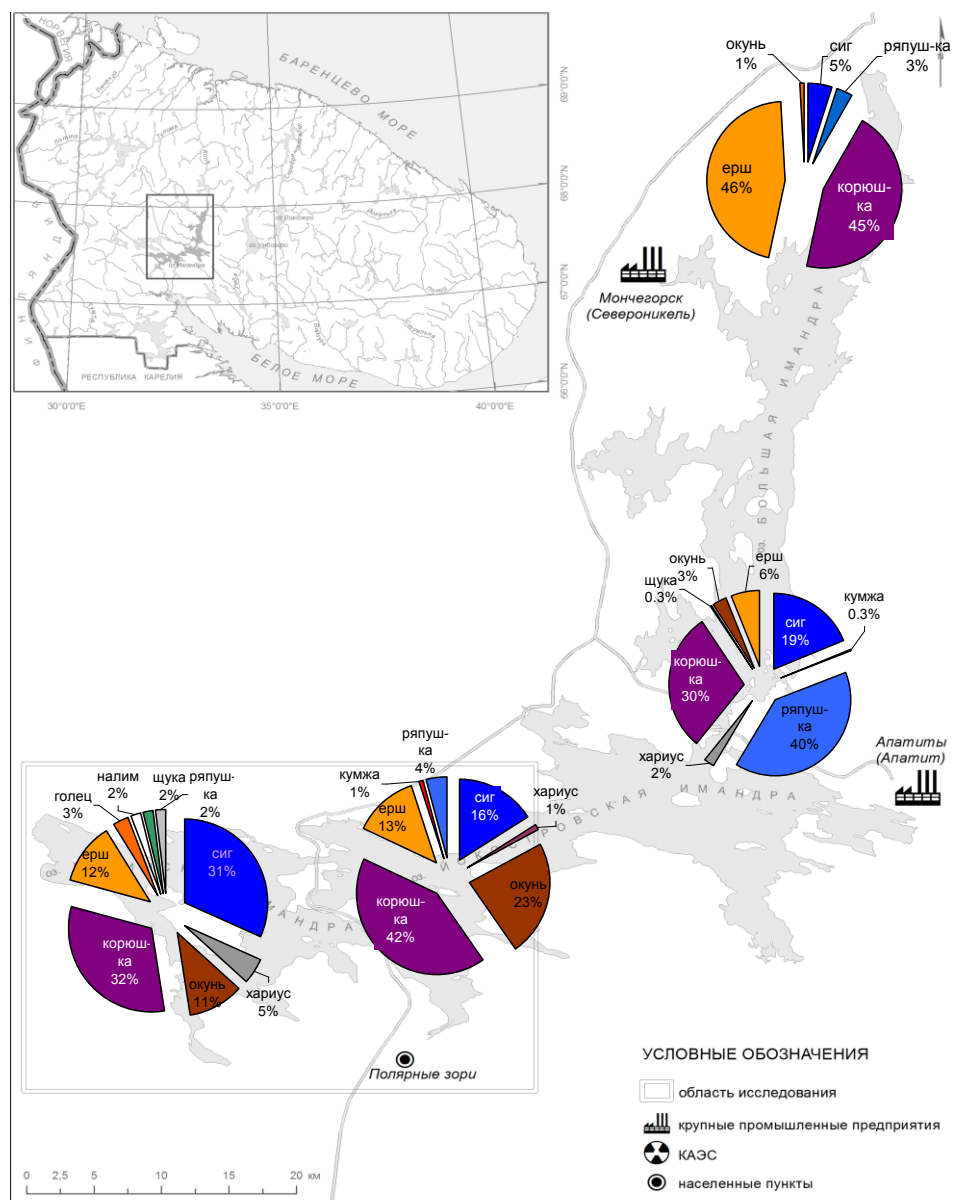


Рис. 17. Долговременные изменения соотношения численности рыб в уловах озера Имандра

В водоемах, удаленных от промышленных источников загрязнения, в последние годы массово распространилась интродуцированная еврейская ряпушка (Amundsen et al., 1999). Оказавшись более эффективным планктонофагом, она вытеснила среднетычинкового сига из зоны пелагиали в места обитания малотычинкового сига, что привело к переходу вытесненной формы-планктонофага на бентосный тип питания. Конкурентные взаимодействия симпатрических форм одного вида сопровождаются перекрыванием их естественных экологических ниш, снижением морфологической дифференциации и, как следствие, усилением процессов гибридизации между ними. Таким образом, результатом межвидовой конкуренции за ресурсы является трансформация рыбного населения и снижение значимости сиговых видов в пресноводных экосистемах Севера.

В оз. Имандра на фоне критического сокращения доли лососевых и сиговых рыб активно расширяет ареал корюшка (рис. 18). В настоящее время она распространяется в придаточные системы: северную часть бассейна Имандры (р. Куреньга – оз. Пермусозеро) и систему реки Большая Белая (оз. Большой Вудъявр), испытывающую интенсивное влияние апатитнефелинового производства.

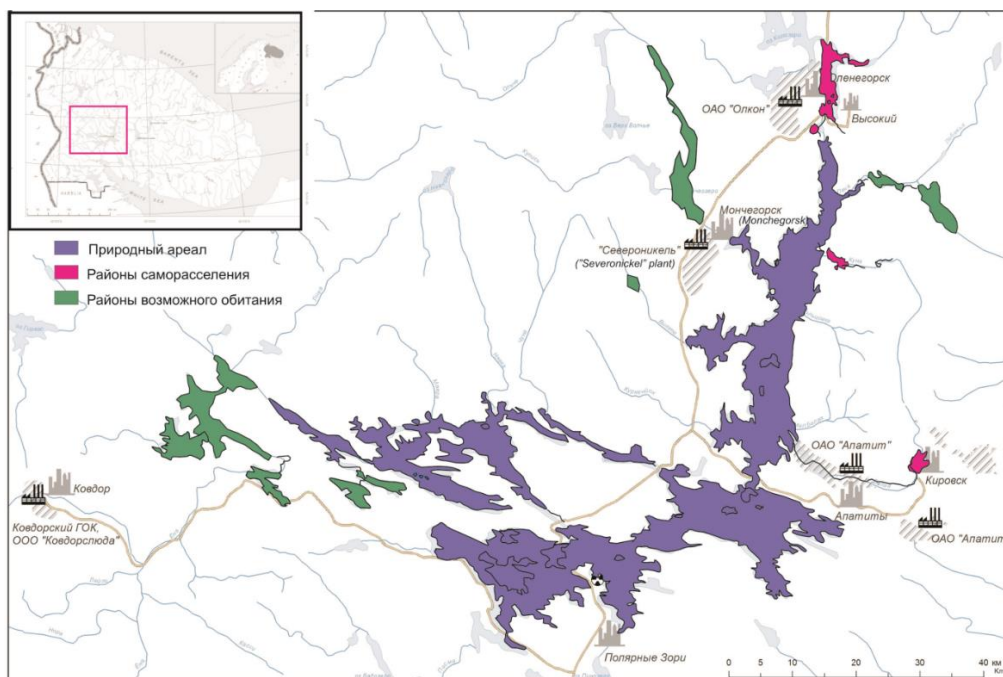


Рис. 18. Распространение европейской корюшки (*Osmerus eperlanus* L.) в бассейне р. Нива

Анализ размерно-возрастных показателей корюшки в оз. Большой Вудъявр свидетельствует о формировании в этом типичном горном водоеме самостоятельно воспроизводящейся группировки, изолированной от основной популяции оз. Имандра. Экспансивная стратегия малоценного с промысловой

точки зрения вида рыб аналогична процессам инвазии чужеродных видов, снижающих устойчивость пресноводных экосистем Севера.

Примером аналогичных изменений могут служить структурные перестройки ихтиофауны малых озер лесной зоны в приграничном районе России, Норвегии и Финляндии. Численность окуня (*Perca fluviatilis* L.) в этих водоемах за последнее десятилетие неуклонно растет при значительном снижении доли сиговых рыб. В ряде озер доля окуня может превышать 90 % от числа рыб в уловах (рис. 19).

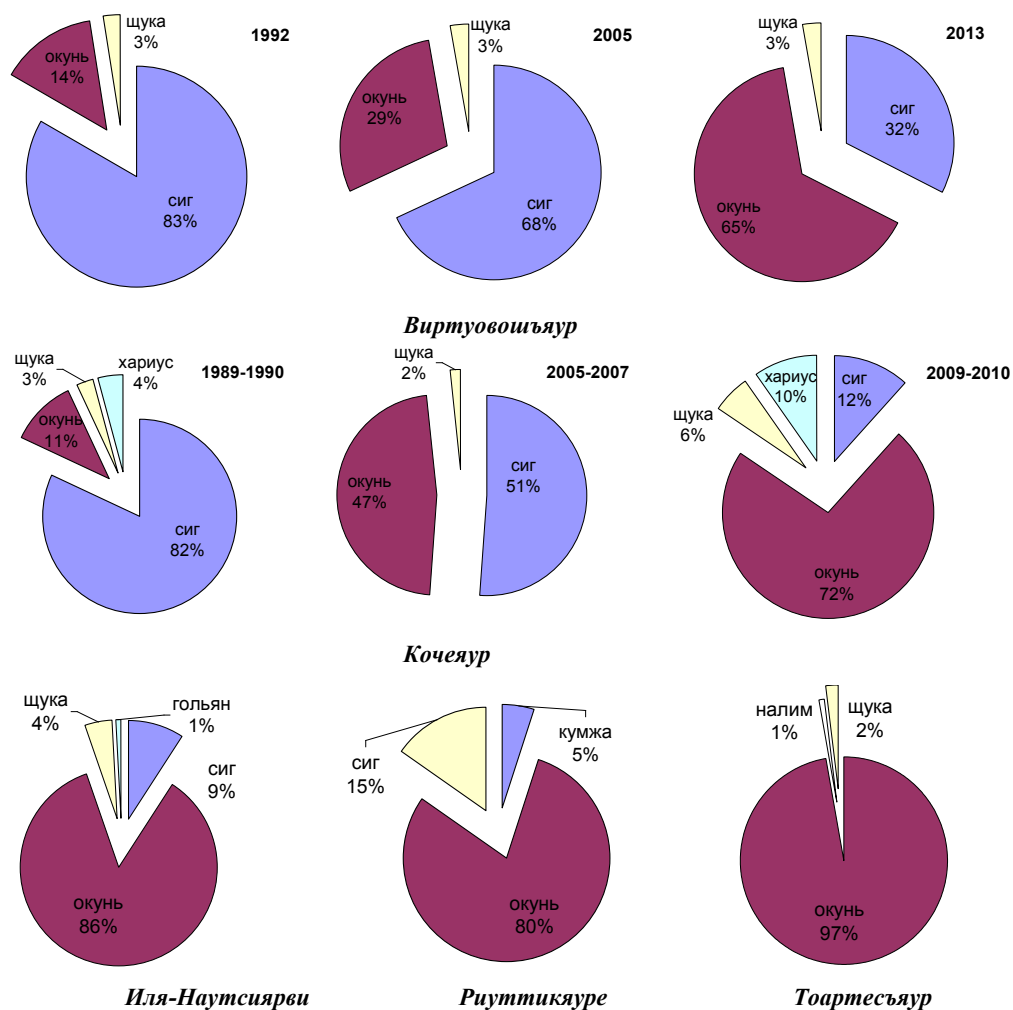


Рис. 19. Долговременные изменения видового состава рыб в уловах озер Мурманской области

У представителей мелких короткоцикловых видов (европейская ряпушка, обыкновенный ерш, европейская корюшка) в водоемах Мурманской области отмечаются несвойственные для арктических экосистем проявления «гигантизма». Размерно-весовые показатели рыб характеризуются максимальными в пределах ареалов видовыми значениями. Наиболее крупные

особи ряпушки достигают массы 86 г и длины тела 20,8 см, ерша — 69 г и 18,7 см, корюшки — 201 г и 25,5 см соответственно (рис. 20). Гигантизм сопровождается увеличением продолжительности жизни рыб. Возраст ряпушки в водоемах Мурманской области обычно не превышает пяти лет (4+), но в последние годы многочисленными являются рыбы в возрасте шести лет (5+). Предельный возраст корюшки в бассейне оз. Имандра также значительно возрос: наиболее крупные особи живут до десяти лет.



Рис. 20. Линейные размеры короткоциклового видов рыб в водоемах Мурманской области

В целом можно констатировать, что относительное снижение интенсивности промышленного производства на пресноводные экосистемы Мурманской области и соседних регионов в последние десятилетия не привело к значительному улучшению состояния ихтиофауны. Если в прошлом веке антропогенное загрязнение водоемов проявлялось в основном на уровне организмов и популяций рыб, то в настоящее время, на фоне вторичного загрязнения и антропогенного эвтрофирования вод, а также в условиях нерационального использования водных ресурсов, глобального загрязнения Арктической зоны и изменения климата, происходит быстрая смена структуры всего рыбного населения водоемов (рис. 21).

Дальнейшая трансформация рыбных сообществ в субарктических водоемах, вероятно, будет развиваться в направлении снижения экологической роли крупных, долгоживущих длиннотелых видов и усиления значимости малоценных с ихтиологической и промысловой точек зрения рыб, что, приведет к снижению ресурсного потенциала поверхностных вод региона. В то же время, повышение трофического статуса озер вследствие процессов эвтрофирования может увеличить их рыбопродуктивность. Для этого необходимо грамотное, научно обоснованное управление водными ресурсами.

Проблемы аквакультуры. Аквакультура становится мощным фактором эвтрофирования и биологического загрязнения водоемов – инвазии новых видов гидробионтов и инфекционных заболеваний, угрожающих природным популяциям рыб. Рыбные болезни, передаваемые от садковых видов свободноживущим рыбам водоемов, могут привести к уничтожению их природных популяций и тем самым нарушить хрупкое равновесие субарктических пресноводных экосистем, а также стать причиной существенного экономического ущерба. Лечение вспышек заболеваний при выращивании рыб

в аквакультуре требуют использования антибиотиков и утилизации десятков тонн зараженной рыбы. Попадание антибиотиков в окружающую среду способствует развитию новых штаммов возбудителей, устойчивых к действию этих препаратов и представляющих угрозу для здоровья человека. Дополнительно, попадающие в окружающую среду антибиотики нарушают природные микробные сообщества, играющие важную роль в циклах химических элементов. Утилизация заболевшей рыбы требует огромных инвестиций и может привести к банкротству, как отдельных рыбных хозяйств, так и важнейшей для арктического региона отрасли коммерческого рыболовства в целом, и, как следствие, к социальной напряженности вследствие ухудшения условий жизни.



Рис. 21. Основные последствия загрязнения окружающей среды и изменения климата для субарктических водоемов в целом и их рыбного населения в частности

Новые подходы к оценке качества вод и состояния водных ресурсов

Особенности функционирования водных экосистем в современных условиях (увеличение токсичности водной среды, радикальные структурно-функциональные перестройки сообществ гидробионтов, изменение трофического статуса водоемов, снижение стабильности пресноводных экосистем, повышение рисков катастрофических деградиционных изменений) требуют пересмотра критериев и методологических подходов к оценке качества поверхностных вод и

организации системы гидроэкологического мониторинга. При разработке показателей качества вод необходимо учитывать современное состояние и региональные особенности водоемов, например, фоновые концентрации элементов в поверхностных водах и донных отложениях. Предлагается за основу брать концентрации тяжелых металлов (ТМ) в условно фоновых водоемах, удаленных от крупных промышленных источников. К примеру, озера восточной части Мурманской области располагаются на достаточном расстоянии от горно-металлургических предприятий, чтобы отнести их к незагрязненным тяжелыми металлами, т.е. «фоновым».

Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области по содержанию тяжелых металлов в воде. Фоновые концентрации тяжелых металлов в воде (Φ_n^i) определяли, как медианное значение (М) концентраций каждого конкретного элемента в 400 озерах восточной части Мурманской области (Кашулин и др., 2010; 2011) плюс одно стандартное отклонение. Использовали именно медианное, а не среднее значение, т.к. озера расположены в разных ландшафтно-географических зонах (тундровой, таежной и их горных аналогах) с различными геохимическими особенностями водосборов, что сказывается на значительных вариациях концентраций элементов. Следовательно, данный метод статистического определения учитывает тот факт, что разные типы водоемов могут иметь различные концентрации ТМ. Если концентрации конкретных элементов в озерах имеют низкий разброс значений, то сумма $M+s_n$ будет близка к М; если разброс велик, сумма рассчитывается статистически достоверным способом. Для определения интенсивности загрязнения пресноводных водоемов тяжелыми металлами по показателю Φ_n^i предложена следующая классификация: $\Phi_n^i < 1$ — фоновое содержание элемента в воде (низкое загрязнение поверхностных вод данным элементом), $1 \leq \Phi_n^i < 5$ — умеренное, $5 \leq \Phi_n^i < 10$ — значительное, $\Phi_n^i \geq 10$ — высокое загрязнение (табл. 5).

Таблица 5

Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области на основе анализа концентраций тяжелых металлов в воде

Элемент	Содержание элемента в воде, мкг/г сух. веса							Степень загрязнения водоема			
	M*	X	min	max	s_n	$M+s_n$	Φ_n^i	фоновое	умеренное	значительное	сильное
Zn	1,7	2,6	нпо	24,0	3,1	4,82	5,0	< 5	5,0–25,0	25,0–50,0	> 50
Cu	0,7	1,37	нпо	22,0	2,5	3,19	3,0	< 3	3,0–15,0	15,0–30,0	> 30
Ni	0,6	1,0	нпо	9,0	1,2	1,77	2,0	< 2	2,0–10,0	10,0–20,0	> 20
Co	0,2	0,3	нпо	8,0	0,8	1,00	1,0	< 1	1,0–5,0	5,0–10,0	> 10
Pb	0,3	0,34	нпо	1,4	0,24	0,54	0,50	< 0,5	0,5–2,5	2,5–5,0	> 5
Cd	0,05	0,10	нпо	0,99	0,16	0,21	0,20	< 0,2	0,2–1,0	1,0–2,0	> 2
As	0,01	0,070	0,010	0,250	0,096	0,106	0,100	< 0,1	0,1–0,5	0,5–1,0	> 1

Примечание. Концентрации элементов: М — медианные, X — средние, min — минимальные, max — максимальные, нпо — ниже предела обнаружения, Φ_n^i — фоновые доиндустриальные; s_n — стандартное отклонение. *Рассчитано на основе концентраций металлов в воде 400 озер восточной части Мурманской области.

Сравнение предлагаемых критериев с существующими нормативными величинами для водоемов Мурманской области — предельно допустимыми

концентрациями тяжелых металлов для вод рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{рбхз}) — и санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами для питьевой воды (Санитарно-эпидемиологические ..., 2002) показало значительное различие, отражающее региональные геохимические особенности формирования химического состава поверхностных вод (табл. 6).

Таблица 6

Предельно допустимые концентрации (ПДК_{рбхз}) и ориентировочные безопасные уровни воздействия вредных веществ для вод рыбохозяйственных водоемов (по: Санитарно-эпидемиологические ..., 2002)

Элемент	ПДК _{рбхз} , мкг/л	СанПиН	
		Первая категория	Высшая категория
Hg	0,01	0,5	0,2
Cu	1	1000	1000
Cd	5	1	1
Ni	10	20	20
Zn	10	5000	3000
Co	10	100	100
As	50	10	6
Pb	100	10	5

Подобный подход применялся при разработке критериев оценки степени загрязнения тяжелыми металлами пресноводных водоемов Канады (Sediment Quality Guidelines, 2018) и Норвегии (Molvær et al., 1997). Критерии, установленные Министерством окружающей среды Канады, основаны на содержании в воде карбоната кальция CaCO₃, определяющего кислотно-щелочные условия, степень минерализации и другие гидрохимические показатели водоемов. В зависимости от содержания CaCO₃ предельно допустимые концентрации тяжелых металлов (например, Ni и Pb) могут отличаться в 5–7 раз (табл. 7, 8).

Таблица 7

Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в воде (ПДК, мкг/л) в зависимости от содержания карбоната кальция (мг/л)

ПДК тяжелых металлов, мкг/л	Pb				Cu			Ni			
	1	2	4	7	2	3	4	25	65	110	150
Содер- жание CaCO ₃ , мг/л	0– 60	60– 120	120– 180	>180	0– 120	120– 180	>180	0– 60	60– 120	120– 180	>180

Таблица 8

Критерии оценки степени загрязнения пресноводных водоемов тяжелыми металлами (мкг/л), принятые в Канаде (Sediment Quality Guidelines, 2018) и Норвегии (Molvær et al., 1997)

Элемент	Критерии (степень загрязнения)					
	Канада	Норвегия				
		фоновое	умеренное	заметное	сильное	очень сильное
Cd	0,017	< 0,04	0,04–0,1	0,1–0,2	0,2–0,4	> 0,4
Hg	0,1	< 0,002	0,002–0,005	0,005–0,01	0,01–0,02	> 0,02
Pb	1–7	< 0,5	0,5–1,2	1,2–2,5	2,5–5,0	> 5
Cu	2–4	< 0,6	0,6–1,5	1,5–3,0	3,0–6,0	> 6
As	5,0	< 0,5	0,5–2,5	2,5–5,0	5,0–10,0	> 10
Ni	25–150					
Zn	30	< 5	5–20	20–50	50–100	> 100

Согласно методике определения интенсивности загрязнения вод, разработанной Комитетом охраны окружающей среды Норвегии, в зависимости от превышения концентраций тяжелых металлов над фоновыми значениями (background), водоемы подразделяются на 5 классов: с умеренным (moderate), заметным (marked), сильным (strong) и очень сильным (very strong) загрязнением (Molvær et al., 1997).

Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области по содержанию тяжелых металлов в донных отложениях. Для разработки критериев оценки степени загрязнения пресноводных водоемов также предлагается проводить сравнительный анализ содержания ТМ в фоновых слоях ДО (на глубине колонки более 20 см) и в 1-см поверхностном слое, отражающем современное экологическое состояние водоемов. Определение фоновых доиндустриальных концентраций элементов основано на методике Л. Хокансона (Håkanson, 1980), который рассчитал этот показатель в донных отложениях 50 озер Швеции, различающихся по размерам, географическому положению, трофическому статусу и другим лимнологическим характеристикам.

Фоновые доиндустриальные значения (C_n^i) для каждого из исследованных элементов определяли как среднее значение фоновых концентраций элемента в 80 озерах Мурманской области плюс одно стандартное отклонение. При низкой степени разброса сумма $X+s_n$ оказывалась близка к X ; в случае большого разброса сумма рассчитывалась статистически достоверным способом. В итоге предложена следующая классификация пресноводных водоемов по степени загрязнения донных отложений тяжелыми металлами: $C_f^i < 1$ — фоновое содержание элемента в ДО (или низкая степень загрязнения ДО), $1 \leq C_f^i < 5$ — умеренное, $5 \leq C_f^i < 10$ — значительное, $C_f^i \geq 10$ — высокое загрязнение (табл. 9).

Канадским министерством окружающей среды определены фоновые концентрации тяжелых металлов в донных отложениях (ISQG) и концентрации, превышение которых может вызвать негативные последствия для жизнедеятельности гидробионтов (PEL) (Sediment Quality Guidelines, 2018) (табл. 10).

Таблица 9

Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области на основе анализа содержания тяжелых металлов в донных отложениях

Элемент	Содержание элемента в воде, мкг/г сух. веса						Степень загрязнения водоема				
	X	min	max	s _n	X+s _n	C _n ⁱ	X	фоновое	умеренное	значительное	сильное
Hg	0,035	0,003	0,112	0,021	0,056	0,060	Hg	< 0,06	0,06–0,3	0,3–0,6	> 0,6
Cd	0,23	0,02	2,10	0,26	0,48	0,50	Cd	< 0,5	0,5–2,5	2,5–5,0	> 5
As	3,2	0,5	13,7	3,2	6,4	7,0	As	< 7	7–35	35–70	> 70
Pb	4,4	0,5	15,0	3,4	7,8	8,0	Pb	< 8	8–40	40–80	> 80
Co	13	2	69	11	23	25	Co	< 25	25–125	125–250	> 250
Cu	27	2	94	22	49	50	Cu	< 50	50–250	250–500	> 500
Ni	27	4	214	27	54	55	Ni	< 55	55–275	275–550	> 550

Примечание. Концентрации элементов: X — средние фоновые, min — минимальные, max — максимальные, C_nⁱ — фоновые доиндустриальные; s_n — стандартное отклонение.

*Рассчитано на основе концентраций металлов в донных отложениях 80 озер Мурманской области.

Таблица 10

Критерии оценки степени загрязнения донных отложений пресноводных водоемов тяжелыми металлами, принятые в Канаде (Sediment Quality Guidelines, 2018) и Норвегии (Molvær et al., 1997)

Элемент	Канадские критерии		Степень загрязнения водоема (норвежские критерии)				
	ISQG	PEL	фоновое	умеренное	заметное	сильное	очень сильное
Hg	0,17	0,486	< 0,15	0,15–0,6	0,6–1,5	1,5–3,0	> 3
Cd	0,60	3,5	< 0,5	0,5–2,5	2,5–10	10–20	> 20
As	5,9	17	< 5	5–25	25–100	100–200	> 200
Cu	36	197	< 30	30–150	150–600	600–1800	> 1800
Ni			< 50	50–250	250–1000	1000–3000	> 3000
Pb	35	91,3	< 50	50–250	250–1000	1000–3000	> 3000
Zn	123	315	< 150	150–750	750–3000	3000–9000	> 9000

Примечание. ISQG (Interim freshwater sediment quality guidelines) — фоновые концентрации, PEL (probable effect level) — уровень возможного эффекта.

Сравнение предлагаемых нормативов с разработанными нормами в Канаде и Норвегии показывает, что они достаточно сопоставимы и могут быть предложены в качестве критериев оценки степени загрязнения тяжелыми металлами пресноводных водоемов Мурманской области. Приведенные критерии разработаны впервые и носят предварительный характер. Для расширения списка контролируемых показателей и обоснования их количественных характеристик требуется более глубокая проработка данного вопроса.

Заключение

На протяжении почти трех десятилетий коллектив лаборатории изучает состояние, динамику и степень антропогенной модификации пресноводных экосистем Евро-Арктического региона. За этот период исследовано более 700 озер фоновых и промышленно загрязненных районов. Собран большой

фактический материал по процессам антропогенной модификации качества вод и ответным реакциям гидробионтов. Изучены отдельные группы гидробионтов и ихтиофауна ряда водоемов. Исследован состав донных отложений разнотипных озер Фенноскандии и характер накопления в них основных элементов-загрязнителей. Проанализированы геохимические циклы элементов, входящих в состав выбросов горно-перерабатывающих предприятий региона. Сформированы уникальные базы данных по различным компонентам субарктических пресноводных экосистем. Разработан оригинальный методологический подход для оценки уровней техногенной нагрузки на субарктические водоемы на основании комплексного анализа абиотических и биотических составляющих их экосистем. Начаты работы по палеоэкологической реконструкции исторического развития субарктических водоемов.

Имеющийся фактический материал требует дополнительного теоретического осмысления, а процесс накопления загрязняющих веществ в водоемах и постоянно меняющиеся условия (изменение уровней нагрузки, нарушение ландшафтных комплексов, климатические изменения, метеорологические условия, вселение новых видов и т.д.), обуславливают необходимость проведения новых исследований. Это позволит продолжить уникальный ряд наблюдений, дающий возможность определить закономерности функционирования пресноводных экосистем региона и спрогнозировать их дальнейшее развитие.

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Научные основы рационального использования и устойчивого развития природных ресурсов поверхностных вод Евро-Арктического региона», № гос. рег.: 114110570120.

Литература

Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб., 1996. С. 189.

Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. 403 с.

Балушкина Е. В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л.: Наука, 1987. 179 с.

Беус А. А., Грабовская Л. И., Тихонова Н. В. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.

Боровичев Е. А., Денисов Д. Б., Корнейкова М. В., Исаева Л. Г., Разумовская А. В., Химич Ю. Р., Мелехин А. В., Косова А. Л. Гербарий ИППЭС КНЦ РАН // Труды Кольского научного центра. Серия Прикладная экология Севера. Вып. 6. 2018. (в печати).

Боровичев Е. А., Исаева Л. Г. Гербарий Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. / Раздел 6. Гербарии России и ближнего зарубежья // Ботанические коллекции — национальное достояние России: сборник научных статей Всероссийской с международным участием научной конференции, посвященной 120-летию Гербария имени И. И. Спрыгина и 100-летию Русского ботанического общества (Пенза, 17–19 февраля 2015). / под ред. д-ра биол. наук, проф. Л. А. Новиковой. Пенза: ПГУ. 2015. С. 339–340.

Вандыш О. И. Зоопланктон как индикатор состояния озерных экосистем Кольского полуострова при действии стоков горно-промышленных предприятий // Экология. 2004. № 2. С. 134–140.

Вандыш О. И., Кашулин Н. А., Черепанов А. А. Долговременные изменения зоопланктонных сообществ озера Имандра в условиях разноуровневого загрязнения стоками горнорудного производства // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2 (17). С. 121–129.

Волошко Л. Н., Сафронова Т. В. Цианобактериальные «цветения» в Финском заливе Балтийского моря // Астраханский вестник экологического образования, 2015. № 2(32). С. 65–73.

Генкал С. И., Денисов Д. Б. Центрические диатомовые (Bacillariophyta) озера Имандра (Кольский полуостров). // Ботанический журнал. 2016. Т. 101. № 10. С. 1133–1144.

Даувальтер В. А. Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология, 1997. № 6. С. 43–53.

Даувальтер В. А. Концентрации металлов в донных отложениях закисленных озер // Водные ресурсы, 1998. Т. 25. № 3. С. 358–365.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря // Вестник Кольского научного центра РАН, 2016. № 1(24). С. 69–80.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Ртуть в донных отложениях озера Имандра, Мурманская область // Сборник трудов Второго международного симпозиума «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты». Новосибирск, 21–25 сентября 2015 г. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2015. С. 123–127.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды Карельского научного центра РАН, 2015. № 9. С. 62–75.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных Субарктических и Арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды Кольского НЦ РАН. Прикладная экология Севера, 2012. Вып. 1. № 2(9). С. 54–87.

Даувальтер В. А., Терентьев П. М. Ртуть и другие тяжелые металлы в донных отложениях и органах и тканях рыб озера Имандра // Материалы VI конференции Ассоциации научных обществ Мурманской области, посвященной Дню российской науки (Кировск, 12 февраля 2018 г.) / Е. А. Боровичёв, Н. Е. Королёва, Ю. Л. Войтеховский (ред.). Апатиты: Изд-во К & М. 2018. С. 36–47.

Денисов Д. Б., Валькова С. А., Терентьев П. М., Сандимиров С. С., Вандыш О. И. Современное состояние экосистемы оз. Имандра в зоне влияния Кольской АЭС (Мурманская область) // Вода: химия и экология, 2017. № 6. С. 41–51.

Денисов Д. Б., Кашулин Н. А. Цианопрокариоты в составе планктона оз. Имандра (Кольский полуостров). // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Апатиты, 2016. Вып. 4. № 7(41). С. 40–56.

Денисов Д. Б., Косова А. Л. Разработка базы данных по диатомовым водорослям Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Апатиты, 2017. Вып. 5. № 6 (8). С. 45–52.

Деньгина Р. С. Экосистема озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. Апатиты. КФ АН СССР, 1980. 78 с.

Дольник Т. В., Стальмакова Г. А. Зоопланктон и зообентос // Большие озера Кольского полуострова. Наука: Ленинградское отделение. 1975. С. 317–336.

Зубова Е. М., Кашулин Н. А., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Валькова С. А. Линейный рост малотычинкового сига *Coregonus lavaretus* (Coregonidae) оз. Имандра (Мурманская область) // Вопросы ихтиологии, 2016. Т. 56. № 4. С. 463–473.

Ильяшук Е. А. Закономерности изменения структуры палеокомплексов хирономид (Diptera: Chironomidae) при долговременных изменениях природной среды и климата (на примере озер Кольского полуострова). Дисс. канд. биол. Наук. С-Петербург, 2001. 190 с.

Каган Л. Я. Диатомовые водоросли Евро-Арктического региона: аннотированная коллекция (древние и современные морские и пресноводные). Под ред. Д. Б. Денисова, Н. А. Кашулина. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. 209 с.

Каган Л. Я. Изменение сообществ диатомовых водорослей при антропогенном преобразовании экосистемы оз. Имандра // Водные ресурсы, 2001. Т. 28, № 3. С. 329–338.

Калинкина Н. М., Куликова Т. П. Эволюционная обусловленность реакции гидробионтов на изменение ионного состава воды (на примере пресноводного зоопланктона). // Известия РАН. Серия биологическая, 2009. № 2. С. 243–248.

Калинкина Н. М., Куликова Т. П. Экологические особенности различных видов пресноводного зоопланктона и их толерантность к антропогенному воздействию. // Структурно-функциональные особенности биосистем Севера (особи, популяции, сообщества). Ч. 1. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 159–162.

Кашулин Н. А. Рыбы малых озер Северной Фенноскандии в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 2004. 130 с.

Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Кашулина Т. Г. и др. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 1: Ковдорский район. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 234 с.

Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН, 2012. Вып. 1. С. 6–53.

Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Сандимиров С. С. и др. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). Апатиты: КНЦ РАН, 2008. Т. 2. 282 с.

Кашулин Н. А., Лукин А. А., Амундсен П.-А. Рыбы пресных вод субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 142 с.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Валькова С. А. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Баренцева моря). В 2 ч. Апатиты, КНЦ РАН, 2010. Ч. 1. 249 с. Ч. 2. 128 с.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Вандыш О. И., Валькова С. А. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Белого моря). В 2 ч. Апатиты, КНЦ РАН, 2011. Ч. 1. 221 с. Ч. 2. 235 с.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Вандыш О. И., Королева И. М., Валькова С. А., Кашулина Т. Г. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейны Баренцева и Белого морей и Ботнического залива Балтийского моря). В 2 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 2013. Ч. 1. 302 с. Ч. 2. 253 с.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Терентьев П. М., Денисов Д. Б. Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран. В 2 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с. Ч. 2. 262 с.

Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. М.: Наука, 1984. 309 с.

Косова А. Л., Денисов Д. Б. Диатомовые комплексы донных отложений оз. Щучье (Хибинский горный массив, Кольский п-ов) // Arctic Environmental Research, 2017. Т. 17. № 3. С. 212–221.

Косова А. Л., Мальшева М. Б., Денисов Д. Б. К методике камеральной обработки проб для диатомового анализа донных отложений // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. В 2 т. Апатиты-СПб: КНЦ РАН, 2011. Т. 1. (А-К). С. 294–295.

Крогиус Ф. В. Предварительный отчет о работе экспедиции на Умбозере и Имандре летом 1930 года // Известия Ленинградского научно-исследовательского ихтиологического института. 1931. Т. 13. Вып. 1. С. 45–61.

Кухарев В. И., Калинин Н. М., Дубровниа Л. В., Рябинкин А. В., Власова Л. И., Морозов А. К., Лозовик П. А. Комплексная оценка эколого-техногенной нагрузки (Костомукшский ГОК) на водные системы (р. Кенти) // Инженерная экология. М.: «Инженерная экология». 1998. № 6. С. 33–41.

Кухарев В. И., Калинин Н. М., Дубровниа Л. В., Рябинкин А. В., Власова Л. И., Морозов А. К., Лозовик П. А. Комплексная оценка эколого-техногенной нагрузки (Костомукшский ГОК) на водные системы (р. Кенти) // Инженерная экология, 1998. № 6. С. 33–41.

Лукин А. А. Патологии рыб как индикатор качества вод Кольского Севера // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 105–119.

Макрушин А. В. Биоиндикация загрязнения внутренних водоемов. // Биологические методы оценки природных вод. М.: Наука, 1984. С. 123–137.

Методы биоиндикации и биотестирования природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 277 с.

Моисеенко Т. И. Изменение стратегии жизненного цикла рыб под воздействием хронического загрязнения вод. // Экология, 2002. № 1. С. 50–60.

Моисеенко Т. И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты; КНЦ РАН, 1997. 261 с.

Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П., Каган Л. Я, Ильяшук Е. А. Палеоэкологическая реконструкция антропогенной нагрузки // Доклады академии наук, 2000, Т. 370, № 1. С. 115–118.

Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П., Каган Л. Я, Ильяшук Е. А. Палеоэкологическая реконструкция антропогенной нагрузки // Доклады академии наук, 2000, Т. 370, № 1. С. 115–118.

Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Каган Л. Я. Горные озера как индикаторы загрязнения воздуха. // Водные ресурсы, 1997. Т. 24, № 24. С. 600–608.

Моисеенко Т. И., Родюшкин И. В., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П. Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера). Апатиты, КНЦ РАН, 1996. 263 с.

Моисеенко Т. И., Яковлев В. А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. С. 221.

Мониторинг окружающей среды в зоне влияния ОАО "Кольская ГМК" и рекультивация нарушенных земель, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kolagmk.ru/files/uploads/monitoring2010.ppt>.

Мордохай-Болтовской Ф.Д. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов // Экология организмов водохранилищ-охладителей. Л.: Наука, 1975. С. 7–69.

Немова Н. Н., Высоцкая Р. У. Биохимическая индикация состояния рыб. М.: Наука, 2004. 215 с.

Никаноров А. М. Гидрохимия: Учебник. 2-е изд. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.

Никаноров А. М., Жулидов А. В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 312 с.

Николаева С. Б., Лаврова Н. Б., Денисов Д. Б. Катастрофические события голоцена в донных отложениях озер Кольского региона (северо-восток Фенноскандинавского щита) // Доклады академии наук, 2017. Т. 473б. № 1. С. 88–92.

Николаева С. Б., Лаврова Н. Б., Денисов Д. Б., Толстобров Д. С. Следы катастрофических процессов в донных осадках озер западного побережья озера Бабинская Имандра (Кольский регион) // Известия РГО, 2016. Т. 148. Вып. 4. С. 38–52.

Николаева С. Б., Лаврова Н. Б., Толстобров Д. С., Денисов Д. Б. Реконструкция палеогеографических обстановок голоцена в районе озера Имандра (Кольский регион): результаты палеолимнологических исследований // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Лимнология, 2015. № 5. С. 78–92.

Никольский Г.В. и др. Современное состояние и перспективы рыбоводства на теплых водах // Биологические ресурсы внутренних водоемов СССР. М.: Наука, 1979. С. 125–138.

Патова Е. Н. Цианопрокариоты, вызывающие «цветение» воды в Харбейских озерах Большеземельской тундры // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Биология, 2014. Т. 7. № 3. С. 282–290.

Петров В. В., Стругач М. Б. Бентос некоторых озер и водохранилищ Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1966. С. 95–104.

Петровская М. В. Характеристика зоопланктона озер Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1966. С. 84–90.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Наука, 1992. 318 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 305 с.

Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.4.1116-02 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tehbez.ru/Docum/DocumShow_DocumID_569.html.

Сергеева В.А. Влияние системы технического водоснабжения Трипольской ГРЭС на зоопланктон водоисточника. Киев: Наукова думка, 1988. 12 с.

Телеш И. В. Роль планктонных ракообразных в водных экосистемах разного типа (на примере Ладожского озера, р. Невы и Невской губы) // Материалы VII съезда гидробиол. общ. РАН. Казань. 1996. Т. 2. С. 90–92.

Терентьев П. М. Особенности динамики популяций рыб в водоемах Кольского Севера в условиях их аэротехногенного загрязнения: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 2005. 28 с.

Терентьев П. М., Кашулин Н. А. Трансформации рыбной части сообществ водоемов Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН, 2012. Вып. 2. С. 61–100.

Шаров А. Н. Фитопланктон водоемов Кольского полуострова. Петрозаводск. Изд-во Карельского НЦ РАН. 2004. 113 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы современной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Яковлев В. А. Воздействие тяжелых металлов на пресноводный зообентос. Ч. 2 Последствия для сообществ // Экологическая химия, 2002. № 11(2). С. 117–132.

Яковлев В. А. Гидробиологические исследования внутренних вод Кольского Севера (оперативно-информационный материал). Апатиты: КНЦ АН СССР, 1991. 53 с.

Яковлев В. А. Изменение структуры зообентоса северо-восточной Фенноскандии под влиянием природных и антропогенных факторов. Автореф. дисс. ... докт. наук. СПб, 1999. 49 с.

Яковлев В. А. Оценка многолетних изменений в развитии и структуре зоопланктона и зообентоса крупного субарктического водоема (на примере оз. Имандра) // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 89.

Яковлев В. А. Оценка степени закисления поверхностных вод северо-восточной Фенноскандии по зообентосу // Водные ресурсы, 1998а. Т. 25. № 2. С. 244–251.

Яковлев В. А. Пресноводный зообентос Северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Апатиты: КНЦ РАН, 2005. В 2-х ч. Ч. 1. 161 с. Ч. 2. 145 с.

Яковлев В. А. Реакция зоопланктона и зообентоса на изменение качества воды субарктического водоема (на примере озера Имандра) // Водные ресурсы, 1998б. Т. 25, № 6. С. 715.

Adams S. M., Ryon M. G. A. A comparison of health assessment approaches for evaluating the effects of contaminant-related stress on fish populations // Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1994. Vol. 3. P. 15–25.

AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo (Norway), 2005. 265 pp.

Amundsen P.-A., Staldivik F. J., Reshetnikov Y. S., Kashulin N. A., Lukin A. A., Bøhn T., Sandlund O. T., Popova O. A. Invasion of vendace (*Coregonus albula*) in a subarctic watercourse // *Biological Conservation*, 1999. Vol. 88. P. 405–413.

Amundsen P.-A., Kashulin N. A., Terentjev P. M., Gjelland K., Koroleva I. M., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Kashulin A. N., Knudsen R. Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse. // *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011. Vol. 182. P. 301–316.

Brezonik P. L., Crisman T. L., Schultz R. L. Planktonic communities in Florida softwater lakes of varying pH // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 1984. Vol. 41. P. 46–56.

Clayton J. I., Kennedy D. A., Nagel T. Soil response to acid deposition, Wind River Mountains, Wyoming: I. Soil properties // *Soil Science Society of America Journal*. 1991. Vol. 55. P. 1427–1433.

Clow D. W., Sueker J. K. Relations between basin characteristics and stream-water chemistry in alpine/subalpine basin in Rocky Mountain National Park, Colorado. // *Water Resources Research*. 2000. Vol. 36. P. 49–61.

Clow D. W., Sickman J. O., Striegl R. G. Changes in the chemistry of lakes and precipitation in high-elevation national parks in the western United States, 1985–1999. // *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39(6). P. 1171–1179.

Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finnish Border Area in Northern Fennoscandia. / Working Paper of the Finnish Forest Research Institute. Eds. J. Derome, T. Myking, P. A. Aarestad. 2008. Vol. 85. 98 p.

Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola Peninsula, Russia. // *Science of the Total Environment*, 1994. Vol. 158. P. 51–61.

Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P.-A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // *Journal of Environmental Science and Health*, 2011. Part A. Vol. 46. P. 1020–1033.

Denisov D. B., Genkal S. I. Centric diatom of lake Imandra (Kola Peninsula, Russia) // *International Journal on Algae*, 2018. № 20(1). P. 27–36.

Elliott J. A. Is the future blue-green? A review of the current model predictions of how climate change could affect pelagic freshwater cyanobacteria // *Water research*, 2012. Vol. 46. P. 1364–1371.

Ernst B., Hoeger S. J., O'Brien E., Dietrich D. R. Abundance and toxicity of *Planktothrix rubescens* in the pre-alpine Lake Ammersee, Germany // *Harmful Algae*, 2009. Vol. 8(2). P. 329–342.

Gliwicz Z. M. Studies on the feeding of pelagic zooplankton in lakes with varying trophy // *Ekologia Polska*. 1969. Vol. 17. № 36. P. 663–708.

Hestagen T., Langeland A., Berger H. M. Effect of acidification due to emissions from the Kola Peninsula on fish populations in lakes near the Russian border in northern Norway // *Water Air and Soil Pollution*. 1998. Vol. 102. P. 17–36.

Hadley K. R., Smol J. P., Douglas M. S., Lim D. Diatom assemblages and limnological variables from 40 lakes and ponds on Bathurst island and neighboring high arctic islands. // *International review of hydrobiology*, 2013. Vol. 98. № 1. P. 44–59.

Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // *Water Research*. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

Henricson A., Dillon P. J., Aherne J. Critical Loads of acidity for surface waters in south-central Ontario, Canada; regional application of Steady-State Water Chemistry (SSWC) model // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 2002. Vol. 59. P. 1287–1295.

Il'yshuk B. P., Il'yshuk E. A. Paleoecological analysis of chironomid assemblages of a mountain lake as a source of information for biomonitoring // *Russian journal of ecology*, 2000. T. 31, № 5. P. 353–358.

Ilyashuk B., Ilyashuk E. Response of alpine chironomid communities (Lake Chuna, Kola Peninsula, Northwestern Russia) to atmospheric contamination // *Journal of Paleolimnology*, 2001. T. 25. № 4. P. 467–475.

Kashulin N. A., Amundsen P.-A., Koroleva I. M., Terentjev P. M., Giellad K. O., Sandimirov S. S., Kudryavtseva L. P., Örn M., Morozov D. N., Lien C., Dasbo L., Knudsen R. State of fish populations in small forest lakes in the Norwegian, Finnish and Russian area. In: *State of the Environment in the Norwegian, Finnish and Russian Border Area* // *The Finnish Environment*, 2007. № 6. 47 p.

Kashulin N. A., Terentyev P. M., Amundsen P.-A., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Kashulin A. N. Specific features of accumulation of Cu, Ni, Zn, Cd, and Hg in two whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) morphs inhabiting the Inari-Pasvik lacustrine–riverine system // *Inland water biology*, 2011. Vol. 4. № 3. P. 383–392.

Lappalainen A., Tammi J., Kashulin N. A. The effect airborne emission from the Pechenganikel smelters on water quality and littoral fish communities of small watercourses in joint Finnish, Norwegian and Russian border area. In: *State of the Environment in the Norwegian, Finnish and Russian Border Area* // *The Finnish Environment*, 2007. Vol. 6. 47 p.

Malley D. F., Findlay D. L., Chang P. S. Ecological effects of acid precipitation on zooplankton // *Acid precipitation: effects on ecological systems*. Ann Arbor: Ann Arbor Publishers, 1982. P. 297–327.

Martinez-Haro M., Beiras R., Bellas J., Capela R., Coelho J. P., Lopes I., Moreira-Santos M., Reis-Henriques A. M., Ribeiro R. A review on the ecological quality status assessment in aquatic systems using community based indicators and ecotoxicological tools: what might be the added value of their combination? // *Ecological Indicators*, 2015. Vol. 48. P. 8–16.

Moiseenko T. I., Sharov A. N., Vandysh O. I., Lukin A. A., Yakovlev V. A. Changes in the biodiversity of surface waters of the north with acidification, eutrophication, and toxic pollution // *Water resources*, 1999. T. 26. № 4. P. 440–448.

Moldan B., Cherny J. Biogeochemistry of Small Catchment: A Tool for Environmental Researches. N-Y.: John Willey & Sons, 1994. 420p.

Molvær, J., Knutsen, J., Magnusson, J., Rygg, B., Skei, J. & Sørensen J. (1997). Classification of environmental quality in fjords and coastal waters. A guide. Norwegian Pollution Control Authority. SFT TA-1467/1997.

Munthe J., Wängberg I., Rognerud S., Fjeld E., Verta M., Porvari P., and M. Meili. Mercury in Nordic ecosystems. Nordic Council of Ministers (NMR). Copenhagen, Tema Nord/IVL Report B. 2007. P. 1–44.

Muniz L. P. Effects of acidification on Scandinavian freshwater fish fauna // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1984. Vol. 305. P. 517–528.

Nanus L., Williams M. W., Campbell D. H., Tonnessen K. A., Blett T., Clow D. W. Assessment of lake sensitivity to acid deposition in national parks of the Rocky mountains // *Ecological Applications*, 2009. Vol. 19(4). P. 961–973.

Nilsson S. I., Bergquist B. Aluminium chemistry and acidification process in a shallow podzol on the Swedish west coast // *Water, Air and Soil Pollution*. 1983. Vol. 20. P. 311–329.

Nilsson S. I. Budgets of aluminium species, iron and manganese in the Lake Gårdsjön catchments in SW Sweden // *Ecological Bulletins*. (Stockholm), 1985. Vol. 37. P. 120–132.

Økland K. A. Localities with *Asellus aquaticus* and *Gammarus lacustris* G. O. Sara in Norway, and a revised system of faunistic regions // *SNSF Teknisk Notat*. 1979. Vol. 49/79. P. 1–64.

Ryazhina S. V., Subetto D. A., Kochkov N. V., Akhmetova N. S., Veinmeister N. V. Polar lakes of the World: current data and status of Investigations // *Water Resources*, 2010. Vol. 37. № 4. P. 427–436.

Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (2018). Canadian Environmental Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment. Retrieved September 4, 2018, from <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html>.

Sonsten L. Fish mercury levels in lakes — adjusting for Hg and fish-size covariation // *Environmental Pollution*, 2003. Vol. 125. P. 255–265.

State of the environment in the Norwegian, Finnish and Russian border area // *The Finnish Environment*, 2007. Vol. 6. 88 p.

Sullivan T. J., Cosby B. J., Jackson W. A., Snyder K. U., Herlihy A. T. Acidification and prognosis for future recovery of acid-sensitive streams in the Southern Blue Ridge Province // *Water, Air and Soil Pollution*. 2011. Vol. 219. Is. 1-4. P. 11–26.

Turk J. T., Campbell D. H. Estimates of acidification of lakes in the Mt. Zirkel Wilderness Area, Colorado // *Water Resources Research*. 1987. V. 23(9). P. 1757–1761.

Vandysh O. I. Effect of acidification on zooplankton communities of small lakes in mountain tundra // *Water resources*, 2002. T. 29. № 5. P. 554–560.

Whitfield A. K., Elliott M. Fishes as indicators of environmental and ecological changes within estuaries: a review of progress and some suggestions for the future // *Journal Fish Biology*, 2002. Vol. 61. P. 229–250.

Ylikörkkö J., Christensen G.N., Kashulin N., Denisov D., Andersen H. J., Jelkänen E. Environmental Challenges in the Joint Border Area. Reports 41. Centre for Economic Development, Transport and the Environment for Lapland. Juvenes Print, 2015. 165 p.

Сведения об авторах

Кашулин Николай Александрович,

Доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; nikolay@inep.ksc.ru

Даувальтер Владимир Андреевич,

Доктор географических наук, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; vladimir@inep.ksc.ru

Денисов Дмитрий Борисович,

Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией водных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; denisow@inep.ksc.ru

Валькова Светлана Александровна,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; Valkova@inep.ksc.ru

Вандыш Оксана Ивановна,

Кандидат биологических наук, ученый секретарь Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; vandysh@inep.ksc.ru

Терентьев Петр Михайлович,

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; pterentjev@mail.ru

Зубова Елена Михайловна,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; seelewolf84@yandex.ru

Королева Ирина Михайловна,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; koririn@yandex.ru

Косова Анна Львовна,

Ведущий инженер Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; annkosova1976@yandex.ru

Черепанов Александр Александрович,

Ведущий инженер Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; cherepanov@inep.ksc.ru

Kashulin Nikolay Alexandrovich,

Dr.Sc. (Biology), Leading Researcher Fellow of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; nikolay@inep.ksc.ru

Dauvalter Vladimir Andreyevich,

Dr.Sc. (Geography), Leading Researcher Fellow of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; vladimir@inep.ksc.ru

Denisov Dmitry Borisovich,

PhD (Biology), Head of Water Ecosystems Laboratory of the Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; denisow@inep.ksc.ru

Valkova Svetlana Alexandrovna,

PhD (Biology), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; Valkova@inep.ksc.ru

Vandysh Oxana Ivanovna,

PhD (Biology), Scientific Secretary of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; vandysh@inep.ksc.ru

Terentjev Petr Mikhailovich,

PhD (Biology), Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; pterentjev@mail.ru

Zubova Elena Mikhailovna,

PhD (Biology), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; seelewolf84@yandex.ru

Koroleva Irina Mikhailovna,

PhD (Biology), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; koririn@yandex.ru

Kosova Anna Lvovna,

Lead Engineer of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; annkosova1976@yandex.ru

Cherepanov Alexander Alexandrovich,

Lead Engineer of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; cherepanov@inep.ksc.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.87-104
УДК 579.26(470.21)

**М. В. Корнейкова, Г. А. Евдокимова, В. А. Мязин, В. В. Редькина,
Н. В. Фокина, Р. Р. Шалыгина, А. А. Чапоргина, Е. С. Янишевская**

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,
Лаборатория экологии микроорганизмов*

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация

Обобщены результаты комплексных научных исследований по оценке микробных ресурсов различных природных зон Кольского полуострова. Приведены данные по численности, биомассе и видовому разнообразию бактерий, микроскопических грибов и водорослей в почвах фоновых и загрязненных газоздушными выбросами предприятий и нефтепродуктами территорий. Изучены возможности использования биотехнологического потенциала микроорганизмов для очистки и ремедиации природных и техногенных сред. Предложена технология плавающих биоплато, подобран ассортимент аборигенных растений-гидрофитов и растений околководных местообитаний, выявлены микроорганизмы, трансформирующие минеральные соединения азота. Разработаны методы очистки сред, загрязненных нефтепродуктами, основанные на использовании микроорганизмов-нефтедеструкторов и растений-мелиорантов. Установлено негативное влияние микроорганизмов на процессы флотации несурьфидных апатит-нефелиновых и сульфидных медно-никелевых руд.

Ключевые слова:

микроорганизмы, биоразнообразие, биотехнологический потенциал, промышленная микробиология, тяжелые металлы, соединения фтора, нефтепродукты, минеральные соединения азота, биоремедиация, Мурманская область.

**M. V. Korneykova, G. A. Evdokimova, V. A. Myazin, V. A. Redkina, N. V. Fokina,
R. R. Shalygina, A. A. Chaporgina, E. S. Yanishevskaya**

MICROBIOLOGICAL RESEARCHES IN THE MURMANSK REGION

Abstract

Microbial resources were assessed in the various natural zones of the Kola Peninsula during integrated research, and the data were generalized. The quantity, biomass and diversity of bacteria, fungi and algae were studied in soils polluted by air emissions and oil products. The biotechnological potential of microorganisms was studied for clearing and remediation of natural and anthropogenic environment. The technology for the floating bio-plateau was suggested and elaborated. The range of the indigenous aquatic and semi-aquatic plants was proposed as bio-plateau components. The microorganisms transforming the mineral nitrogen compounds were discovered. The methods based on oil-degrading microorganisms and ameliorant plants were elaborated to restore the areas contaminated by oil products. The negative microorganism's impact to the flotation processes in the non-sulphide apatite-nepheline and sulphide copper-nickel ores were established.

Keywords:

microorganisms, biodiversity, biotechnological potential, industrial microbiology, heavy metals, fluorine compounds, oil products, nitrogen compounds, bioremediation, Kola Peninsula.

Введение

Самыми древними живыми существами на планете Земля являются микроорганизмы. Они обладают высокой физиологической активностью и разнообразием функций и способны перерабатывать природные органические вещества. Микроорганизмы составляют основной природный генофонд, противостоящий изменениям окружающей среды.

Неотъемлемым компонентом биосферы и средой обитания для множества живых организмов является почва, в ней замыкаются и протекают важнейшие процессы круговорота вещества и энергии между земной корой, атмосферой и гидросферой. Микроорганизмы осуществляют процессы самоочищения почвенной среды от загрязняющих веществ, трансформируя ксенобиотики в нетоксичные минеральные соединения. Неблагоприятное воздействие загрязняющих веществ на почвенную микробиоту оказывает отрицательным и для всей экосистемы.

Микробиота северных почв отличается рядом специфических черт, обусловленных особенностями среды обитания: мезо- и психротолерантностью, олиготрофностью, низким видовым разнообразием, высокой продуктивностью в течение полярного лета, карликовостью бактериальных клеток, уменьшением диаметра грибного мицелия, редукцией жизненного цикла и доминированием форм со стерильным мицелием у микроскопических грибов (Паринкина, 1989; Евдокимова, Мозгова, 1995).

Мурманская область характеризуется уникальным сочетанием суровых климатических условий и интенсивным развитием промышленности. Крупными предприятиями, воздействующими на природные экосистемы региона, являются Кандалакшский алюминиевый завод и медно-никелевые комбинаты «Североникель» и «Печенганикель». В связи с перспективой освоения шельфа Баренцева моря и развитием нефтегазового сектора экономики в будущем возможно возрастание степени загрязнения экосистем региона нефтепродуктами (НП). Последствия суммарного воздействия всех видов загрязнений на окружающую среду и здоровье человека еще полностью не изучены.

Возрастание техногенной и антропогенной нагрузки на окружающую среду со стороны отдельных видов промышленного производства, интенсивное несбалансированное природопользование уже привело к накоплению комплекса экологических проблем, которые имеют устойчивую тенденцию к обострению. Одним из ключевых факторов, создающих определенные риски для социально-экономического развития как Мурманской области, так и Арктической зоны в целом, является уязвимость высокоширотных экосистем, обусловленная слабым потенциалом самоочищения и низкой скоростью биохимических реакций в условиях пессимальных температур. В связи с этим в рамках реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации» необходимо проводить комплексные научные исследования состояния микробиоты различных природных сред (воздуха, почвы, воды), направленные на сохранение и рациональное использование ресурсов.

Основными направлениями деятельности лаборатории экологии микроорганизмов являются:

- 1) оценка микробных ресурсов Севера и роли почвенной микробиоты в поддержании и регулировании современных биогеохимических циклов при экстремальных природных и техногенных воздействиях; исследование

биологического и функционального разнообразия почвенных грибов и водорослей;

2) анализ трофических и регуляторных процессов в микробных ценозах при биологической трансформации загрязняющих веществ;

3) изучение аэромикробиоты в чистых и загрязненных районах Мурманской области;

4) исследование микробиологических процессов в системе добычи, переработки, трансформации полезных ископаемых и хранения производственных отходов;

5) разработка биотехнологий очистки и ремедиации природных и техногенных сред от нефтяных и других загрязнителей.

Объекты и методы

Исследования по указанным направлениям проводили в почвах тундровой зоны, лесотундровой и северо-таежной подзон, а также на территориях, подверженных воздействию выбросов промышленных предприятий региона (медно-никелевые комбинаты «Североникель», «Печенганикель», Кандалакшский алюминиевый завод) и загрязненных нефтепродуктами (рис. 1).



Рис. 1. Районы исследований.

Фоновые: 1 — пос. Дальние Зеленцы, 2 — заповедник Пасвик,

4 — п-ов Рыбачий, 6 — Апатитский и 8 — Ковдорский районы.

Загрязненные: 3 — Печенгский, 5 — Мончегорский, 7 — Кандалакшский районы

Для оценки состояния окружающей среды проводили химические анализы, включающие: определение общего и водорастворимого органического углерода и общего азота, измерение подвижных химических элементов в почве, определение катионообменных свойств, обменного кальция и магния, оценку кислотно-основных свойств почвы (актуальной и потенциальной кислотности, гидролитической кислотности), определение содержания тяжелых металлов, фторидов, нефтепродуктов, измерение интенсивности дыхания почв, оценку

ферментативной активности субстратов (уровень ферментов дегидрогеназы, фосфатазы, уреазы, инвертазы) и измерение концентрации ионов аммония, нитрит- и нитрат-ионов.

Объектом микробиологических анализов являются основные группы микроорганизмов: бактерии, микроскопические грибы, водоросли и цианобактерии. Микробиологический анализ включал определение общей численности бактерий и грибов методами поверхностного и глубинного посева на селективные питательные среды, расчет биомассы бактерий и грибов и длины грибного мицелия методом флуоресцентной микроскопии с использованием поликарбонатных мембранных фильтров (Olsen, Novland, 1985). Численность живых клеток водорослей определяли методом прямого счета под люминесцентным микроскопом на сухих мазках почвенной суспензии (Кондакова, Домрачева, 2007). Для выявления видового разнообразия использовали метод посева на жидкие и агаризованные питательные среды 1N-BBM, 3N-BBM, Z8 (Гайсина и др., 2008; Kotai, 1972). Идентификацию водорослей и микроскопических грибов проводили с использованием световой микроскопии на основе культурально-морфологических признаков с привлечением молекулярно-генетических методов. Оценку численности и разнообразия микроорганизмов в воздушной среде проводили при помощи автоматического переносного пробоотборника ПУ-1Б с принудительным осаждением микробов из воздуха на поверхность питательной среды (Лабинская, 1978).

Результаты исследований

Промышленная микробиология

Одним из направлений исследований Лаборатории является промышленная микробиология, а именно, изучение биотехнологического потенциала микроорганизмов в следующих отраслях:

- очистка сточных вод от минеральных соединений азота с использованием биотехнологического потенциала высших растений и микроорганизмов;
- очистка территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами (НП), с помощью сорбентов и с использованием методов биоремедиации;
- влияние микроорганизмов на процессы флотации при обогащении руд;
- биовыщелачивание цветных металлов из бедных руд Мурманской области.

Очистка сточных вод от минеральных соединений азота с использованием биотехнологий. Сотрудниками Лаборатории экологии микроорганизмов ИППЭС КНЦ РАН совместно с Полярно-альпийским ботаническим садом-институтом им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН (ПАБСИ КНЦ РАН) проводятся исследования по созданию плавающих биоплато на пруду-отстойнике Кировогорского карьера АО «ОЛКОН» в окрестностях г. Оленегорск с целью снижения содержания минеральных соединений азота в сточных карьерных водах (Евдокимова и др., 2015; 2016). Ежемесячно в отстойник поступает в среднем 5000–6000 кг нитратов, 30–50 кг нитритов, 60–80 кг аммонийного азота. Скорость потока сточных вод достаточно высокая, глубина отстойника достигает 2 м. Это затрудняет применение традиционной технологии очистки сточных вод путем создания насыпного ложа для высадки водной растительности. В этих условиях

приоритетной становится разрабатываемая нами технология плавающих биолато (рис. 2), запатентованная в 2015 году (Патент РФ № 2560631 от 22.07.2015).

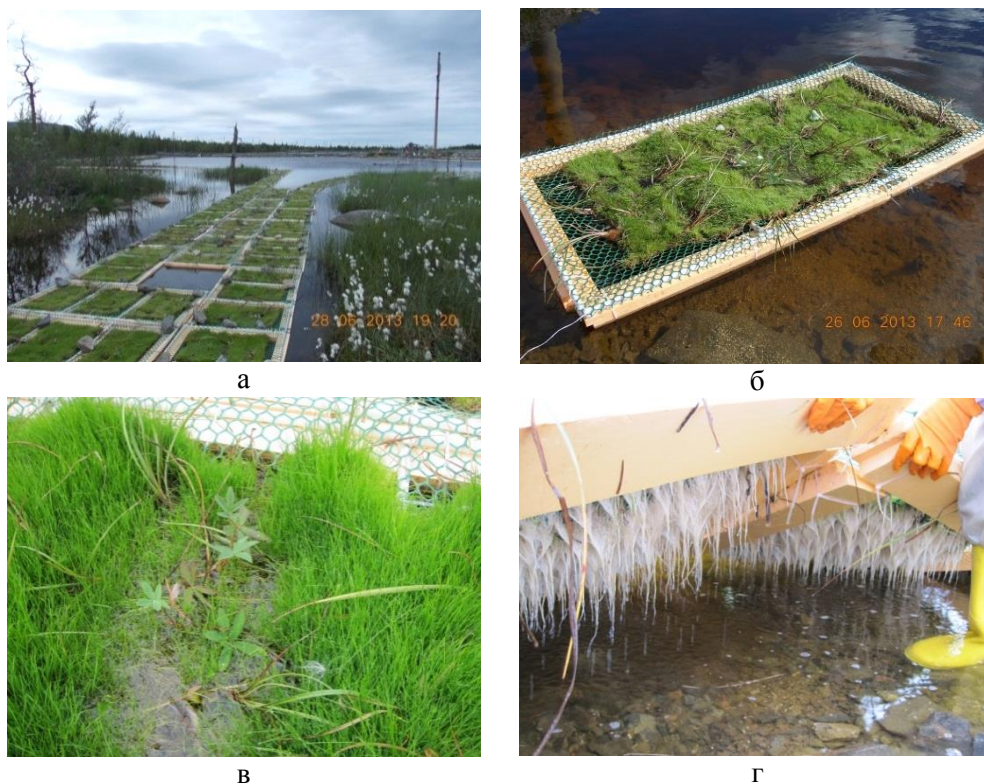


Рис. 2. Плавающее биолато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота:

а — конструкция биолато, б — фрагмент биолато, в — растения-гидрофиты, г — корневая система растений

Для создания фитоценоза биолато подобран ассортимент аборигенных растений околководных местообитаний и гидрофитов: пушица многоколосковая или узколистная (*Eriophorum angustifolium* Honck. (= *E. polystachion* L.)), пушица Шейхцера (*E. scheuchzeri* L.), вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata* L.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), калужница болотная (*Caltha palustris* L.), хвощи топяной (*Equisetum fluviatile* L.) и болотный (*E. palustre* L.), ивы филиколистная (*Salix phylicifolia* L.) и козья (*S. caprea* L.), виды рода сфагнум (*Sphagnum* spp.), ряска (*Lemna minor* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), виды рода осока (*Carex* spp.). Разработан способ закрепления растений на плавающих плато и их выращивания на водной поверхности в условиях Арктики.

В воде пруда-отстойника выявлены микроорганизмы, трансформирующие минеральные соединения азота и способствующие совместно с растениями снижению концентрации его аммонийных и нитратных форм в водоеме. В аэробных условиях нитрифицирующие бактерии окисляют аммиачную форму азота через промежуточную стадию нитритов до нитратов. Денитрифицирующие

бактерии восстанавливают нитратные формы азота до молекулярного азота; этот процесс анаэробный, активно протекает в зарастающих эвтрофных водоёмах при значениях рН 7–8, достаточном количестве нитратов и легкодоступного органического вещества.

В ходе лабораторных опытов было установлено, что оптимальная для снижения содержания нитратов величина покрытия водоема плавающими биоплато с растительностью составляет 50% от общей площади очищаемого водоема. На практике применение плавающих биоплато на пруду-отстойнике в период 2013–2016 гг. способствовало уменьшению содержания аммонийной и нитритной форм азота в воде отстойника до уровня ПДК и ниже. Отмечена тенденция к снижению концентрации нитратного азота. Разработанная технология может быть применена в любой климатической зоне с характерным для нее ассортиментом растений-мелиорантов.

Оценка нефтеструктурного потенциала микроорганизмов и разработка методов биоремедиации нефтезагрязненных почв. Месторождения углеводородов на шельфе Баренцева и Карского морей являются стратегическим резервом нефтегазового комплекса Российской Федерации на долгосрочную перспективу. Мурманская область, полностью вошедшая в состав сухопутной части Арктической зоны РФ является одним из основных центров транспортировки углеводородного сырья. Это делает актуальным разработку методов очистки территорий, загрязненных нефтью и НП, с применением биоремедиации и сорбентов. Сотрудниками лаборатории проводится изучение влияния нефтепродуктов на микроорганизмы и разрабатываются способы биоремедиации загрязненных почв.

Выявлена устойчивость бактерий к загрязнению почвы легкими углеводородами (дизельное топливо, газовый конденсат), содержание которых в почве не превышает 10 %. Это относится как к сапротрофным бактериям в целом, особенно к их пигментированным формам, так и к специализированной группе углеводородокисляющих бактерий (Фокина, 2010). Основу альгоцианобактериальных сообществ нефтезагрязненных почв образуют зеленые водоросли. Высокую степень устойчивости проявляют отдельные виды цианобактерий, являющиеся не только азотфиксаторами, но и участниками процесса биodeградации нефти. В отношении микромицетов установлено, что загрязнение почв НП в большей степени оказывает влияние на видовой состав и структуру их комплексов, чем на численность. Отмечено снижение разнообразия и изменение видовой структуры микроскопических грибов. Из почв Кольского полуострова выделены группы видов микромицетов, толерантных и чувствительных к различным видам НП: дизельному топливу, газовому конденсату, смеси мазута и бензина (Корнейкова и др., 2011).

Биоремедиация основана на способности микроорганизмов к деградации нефти и НП. Эффективность процесса очистки нефтезагрязненных сред зависит от ряда факторов, в том числе — от правильного подбора микроорганизмов-деструкторов (Евдокимова, Маслобоев, 2011). Среди штаммов микроорганизмов нами выделены штаммы бактерий и микроскопических грибов, обладающие высокой нефтеструктурной активностью. К ним относятся виды бактерий из рода *Pseudomonas* (*P. fluorescens*, *P. putida*, *P. baetica*), *Microbacterium paraoxydans* и виды микроскопических грибов рода *Penicillium*: *P. commune*,

P. canescens st.1, *P. simplicissimum* st.1, *P. restrictum*, *P. ochrochloron* (Евдокимова и др., 2009; Evdokimova et al., 2012; Чапоргина, Корнейкова, 2016).

Максимальное содержание углеводов в почве, при котором возможно ее самоочищение в условиях Кольского Севера за один вегетационный период, равно 15 г/кг для светлых НП (дизельное топливо, газовый конденсат) и 5 г/кг для тёмных НП (мазут, отработанное машинное масло). Биоремедиация эффективна для очистки и восстановления почв, загрязненных дизельным топливом, мазутом и отработанным машинным маслом, при уровне содержания углеводов до 50 г/кг. Различные приемы биоремедиации позволяют ускорить процесс очищения почвы на 20–50 % за один вегетационный период (Маслобоев и др., 2014; Евдокимова и др., 2015; Мязин, 2015).

Наиболее эффективным способом очистки почвы оказалась биостимуляция, т.е. активизация деятельности аборигенной углеводородокисляющей микробиоты почвы за счет улучшения в ней водно-воздушных и питательных условий за счет рыхления и внесения удобрений (рис. 3).

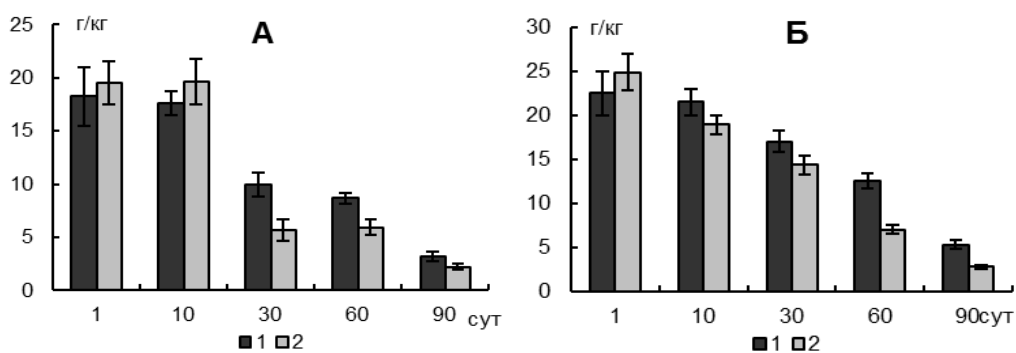


Рис. 3. Содержание углеводов в слое почвы 0–10 см при загрязнении дизельным топливом в объемах 10 (А) и 14 (Б) л/м²:
1 — без проведения биостимуляции, 2 — с биостимуляцией

Подобран ассортимент растений, устойчивых к загрязнению почвы НП: двукисточник тростниковидный (*Phalaroides arundinacea* (L.) Rausch); волоснец песчаный (*Leymus arenarius* (L.) Hochst); овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds); рожь двулетняя (*Secale cereale* L.) и некоторые другие. Данные виды рекомендованы для проведения фиторемедиации нефтезагрязненных почв (Евдокимова и др., 2007; Мязин, Редькина, 2016а; Мязин, Редькина, 2016б).

Исследование влияния микроорганизмов на процессы флотации при обогащении руды. С 2004 года сотрудники лаборатории изучают функционирование микроорганизмов в целостной системе переработки апатит-нефелиновых и медно-никелевых руд на обогатительных фабриках ОАО «Апатит» и Кольской ГМК. Установлено, что в образцах руды и оборотной воды, как на фабрике АНОФ-2, так и на комбинате «Печенганикель», численность сапротрофных и других трофических групп бактерий невелика (рис. 4), но увеличивается в ходе флотации за счет поступления питательных веществ с флотореагентами, а также благодаря аэрации и более высокой температуре (Воронина и др., 2007).

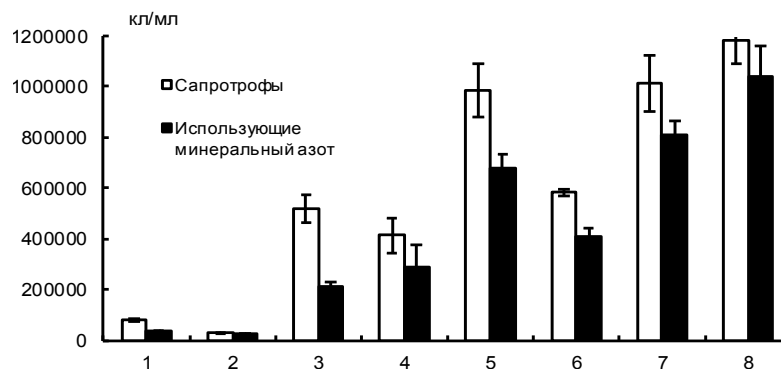


Рис. 4. Численность бактерий (к/мл) в образцах флотации апатит-нефелиновой руды на фабрике АНОФ-2, сентябрь 2005 г.:

1 — руда; 2 — оборотная вода; пенные продукты: 3 — основной флотации; 4 — контрольной флотации; 5 — I перечистки; 6 — II перечистки; 7 — III перечистки; 8 — хвосты

Из оборотной воды и основных продуктов флотации выделены штаммы бактерий, частота встречаемости которых превысила 60 %, они относились к роду *Pseudomonas*. На ОАО "Апатит" обнаружены еще 2 штамма с частотой встречаемости более 60 %, принадлежащие к родам *Stenotrophomonas* и *Acinetobacter*. Обнаружено ухудшение процесса флотуемости апатита в присутствии бактерий за счет их взаимодействия с активными центрами кальцийсодержащих минералов и интенсивной флокуляции, что приводит к снижению селективности процесса флотации (Фокина и др., 2016). Лабораторные опыты по флотации исходной медно-никелевой руды на водопроводной воде в фабричном режиме показали, что в присутствии доминирующих бактерий и с увеличением их численности время флотации возрастает (табл. 1).

Таблица 1

Изменение времени флотации в зависимости от концентрации бактерий в жидкой фазе флотации сульфидных медно-никелевых руд

Численность бактерий, к/мл	Время флотации по операциям, мин		
	Межцикловая флотация	I перечистка	Контрольная флотация
0	27,42	6,32	8,34
10 ³	27,15	6,50	7,07
10 ⁵	27,15	7,45	7,45
10 ⁶	26,45	7,30	8,00
10 ⁷	28,40	9,00	10,30

Численность грибов в цикле обогащения апатит-нефелиновой руды на фабриках была очень низкой: от 1 до 24 колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 мл жидкой фазы или в 1 г руды. Доминировали грибы рода *Penicillium*, встречались грибы родов *Acremonium*, *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Chaetomium*. На комбинате «Печенганикель» выделены виды грибов *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium aurantiogriseum* и *P. glabrum*.

Исследование роли микроорганизмов в процессах биовыщелачивания цветных металлов. В 2016 году сотрудники лаборатории начали исследования деятельности микроорганизмов в процессах биовыщелачивания меди и никеля из руд, содержащих цветные металлы, на примере Аллареченского месторождения. Результаты показали невысокую численность и трофическое разнообразие микроорганизмов. В образцах месторождения были выявлены тионовые и сульфатредуцирующие бактерии, способствующие бактериальному выщелачиванию сульфидных руд. Образцы имели кислую реакцию среды, благоприятную для развития микроорганизмов этих групп. Совместно с сотрудниками Лаборатории экологии промышленного производства ИППЭС КНЦ РАН начаты работы по использованию бактерий в процессах выщелачивания с целью изучения в дальнейшем возможностей кучного выщелачивания.

Экология микроорганизмов природных и антропогенных экосистем

Важным направлением работы сотрудников лаборатории являются бактериологические, микологические и альгологические исследования почвенной и воздушной среды фоновых и загрязненных районов Мурманской области.

В почвах тундровой зоны выявлено 36 видов микроскопических грибов, относящихся к 16 родам, 13 семействам, 8 порядкам, 5 классам и 2 отделам. В таежной зоне разнообразие почвенных микромицетов существенно выше и представлено 87 видами, принадлежащими к 31 роду, 21 семейству, 11 порядкам, 5 классам и 2 отделам. В обеих природных подзонах Мурманской области преобладают микроскопические грибы из рода *Penicillium*, которые составляют 38–50 % от общего числа выделенных видов. В тундровых почвах доминируют виды *Penicillium melinii*, *P. raistrickii*, *P. simplicissimum* и *Mortierella longicollis*. Для северотаежных почв характерен иной видовой состав и структура комплексов микромицетов: доминируют *P. decumbens*, *P. implicatum*, *M. longicollis* и *Umbelopsis isabellina*.

Численность микроскопических грибов в тундровых почвах колеблется от 8 до 328 тыс. КОЕ/г, биомасса в среднем составляет $1,81 \pm 0,19$ мг/г, длина грибного мицелия 245 ± 25 м/г. Численность микромицетов северотаежных подзолов изменяется от 80 до 350 тыс. КОЕ/г, в отдельные годы число грибных пропагул достигает 600 тыс. КОЕ/г; биомасса грибов варьирует от 0,23 до 6,2 мг/г, длина грибного мицелия — от 32 до 3900 м/г.

Численность микроскопических грибов в воздушной среде тундровых экосистем изменяется от 11 до 145 КОЕ/м³, таежных — от 35 до 180 КОЕ/м³. Разнообразие микромицетов-аэробий в таежной зоне богаче, чем в тундре. В воздухе фоновых участков тундровой зоны доминируют виды *Penicillium decumbens*, *P. raistrickii*; таежной зоны *P. raistrickii*, представители рода *Torula* и *Sterilia mycelia* (Корнейкова и др., 2015).

В зоне воздействия медно-никелевого предприятия нарушение гомеостаза микробного сообщества установлено при следующем содержании тяжелых металлов в подзолистой почве, мг/кг: меди 300–400, никеля 600–700 (Евдокимова, 1995). Антропогенное воздействие привело к уменьшению числа редко встречающихся видов и обильному росту нескольких широко распространенных видов. Из почв, подверженных хроническому воздействию газо-воздушных выбросов медно-никелевого комбината на протяжении нескольких десятков лет (40–50 лет), на расстоянии 7–10 км по розе ветров исчезли отдельные физиологические группы

бактерий-нейтрофилов: азотфиксирующие бактерии рода *Clostridium*, нитрифицирующие и целлюлозолитические бактерии, цианобактерии.

Воздушные выбросы Кандалакшского алюминиевого завода (КАЗ) в значительно меньшей степени, чем выбросы медно-никелевого предприятия, влияют на состояние почвенной микробиоты и растительного покрова. Прокариотная часть микробного сообщества более устойчива к выбросам алюминиевого завода, чем эукариотная составляющая почв. Нарушения в структуре бактериального сообщества в зоне воздействия КАЗ наблюдались, начиная с концентрации фтора в почве 1500–2000 мг/кг. Устойчивыми к загрязнению почвы соединениями фтора были неспорообразующие протеобактерии родов *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, *Rhodococcus*. Изменения в численности, структуре и составе грибных сообществ отмечались при более низком содержании фтора в загрязненной почве — 500–600 мг/кг.

В зоне воздействия медноникелевого комбината «Печенганикель» эродированная, лишенная растительности почва способствует бактериальному загрязнению воздуха. Численность бактерий в воздухе зоны максимального загрязнения в 3 км от комбината составила 100–600 КОЕ в 1 м³. Доминировали грамотрицательные бактерии из отдела *Gracilicutes*. По мере удаления от комбината число бактериальных клеток в воздухе снижалось до 8–40 КОЕ/м³, что сопоставимо с фоновыми лесными экосистемами Мурманской области и свидетельствовало о бактериологической чистоте воздуха.

В воздушной среде, подверженной воздействию выбросов промышленных предприятий, формируются специфические комплексы микромицетов, отличные от фоновых. Видовое разнообразие микроскопических грибов в воздухе и почве по градиенту загрязнения от комбината «Печенганикель» представлено 27 видами, 14 родами, 13 семействами, 7 порядками, 5 классами, 2 отделами. В зоне сильного загрязнения в воздухе по обилию доминировал гриб *Gongronella butleri*, в почве — *Trichoderma viride*; отмечен вид *Torula lucifuga*, не встреченный на более удаленных от комбината участках. На фоновом участке в обеих средах доминировал гриб *Penicillium raistrickii*.

Видовое разнообразие комплексов микроскопических грибов в воздухе и почве по градиенту загрязнения от КАЗа было представлено 44 видами, относящимися к 20 родам, 14 семействам, 9 порядкам, 5 классам, 2 отделам, и группой грибов со стерильным мицелием. В воздухе в 2 км от источника выбросов по показателю индекса обилия доминировал гриб *Cladosporium oxysporum*, в воздухе фонового участка — виды рода *Torula* и грибы со стерильным мицелием. В почве вблизи алюминиевого завода доминировал *Penicillium spinulosum*, часто встречались виды *P. implicatum* и *Trichoderma viride*. В контроле доминирующих видов выделено не было, часто встречались *T. viride*, *C. resinae*, *P. trzebinskii*, *Umbelopsis isabellina*. Вид *Memmoniella echinata* имел высокий показатель обилия на всех участках, *C. resinae*, *P. trzebinskii* — на фоновом участке.

Выявлены микромицеты — биоиндикаторы загрязнения почв соединениями тяжелых металлов и фтора. По отношению к фтору выделены три группы грибов: устойчивые, умеренно-толерантные и чувствительные. Самым устойчивым к фтору оказался темноокрашенный гриб *Cladosporium cladosporioides*. Менее устойчивым — *Alternaria alternata*. Умеренно-толерантными оказались темноокрашенные микроскопические грибы *Cladosporium resinae*, *Wardomyces anomalus* и светлоокрашенные *Aspergillus*

fumigatus, *Mucor hiemalis*. Самыми чувствительными из исследованных видов оказались *Culvularia intermedia* (темноокрашенный), *Penicillium trzebinskii* и *Trichoderma polysporum* (светлоокрашенные). В лабораторных опытах выявлено, что грибы с темнопигментированным мицелием более устойчивы к фтору, чем светлоокрашенные (Чапоргина, Корнейкова, 2014).

Среди микромицетов как природных, так и загрязненных почв Кольского полуострова выделены условно патогенные грибы (УПГ), способные вызывать у человека микозы, аллергические реакции и заболевания органов дыхания. Наибольшее количество видов УПГ относится к родам *Penicillium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Lecanicillium* и *Phoma*. Выявлено увеличение доли условно патогенных грибов по сравнению с почвами фоновых территорий на 15 % в зоне воздействия выбросов алюминиевого и медно-никелевого предприятий и на 20–25 % в почвах, загрязненных нефтепродуктами. В загрязненных почвах возрастает не только обилие видов потенциально патогенных грибов, но и частота их встречаемости (Корнейкова и др., 2012).

Штаммы грибов, выделенные из загрязненной почвы, оказались более патогенны по сравнению со штаммами из чистой почвы (Корнейкова, Лебедева, 2016). В зоне воздействия алюминиевого завода наиболее опасными для человека были 7 штаммов (или 9 % от общего количества штаммов грибов, выделенных из почв): *Amorphotheca resiniae* st.1, *Aspergillus fumigates* st.1, *A. niger*, *Paecilomyces variotii* st.1, *Penicillium commune*, *P. purpurogenum*, *Trichoderma viride* st.1. Эти виды обладали протеазной, фосфолипазной активностью и способностью роста при температуре +37 °С. В настоящее время проводятся исследования свойств патогенности у штаммов грибов, выделенных из почв, загрязненных нефтепродуктами и тяжелыми металлами.

Исследована устойчивость к антибиотикам бактерий и микроскопических грибов, выделенных из фоновых и загрязненных выбросами алюминиевого завода почв. Антибиотическая активность выявлена у 15 из 85 исследованных штаммов. Грамотрицательные бактерии оказались более устойчивы к действию антибиотиков, продуцируемых микромицетами, по сравнению с грамположительными бактериями. Самой устойчивой к метаболитам микроскопических грибов оказалась тест-культура *Pseudomonas fluorescens*. Добавление в среду для культивирования микромицетов 50–300 мг/л фтора оказало влияние на их антагонистическую активность в отношении бактерий: у 50% изученных штаммов не отмечено изменения антибиотической активности, активность *Penicillium aurantiogriseum* и *P. ochrochloron* усиливалась, а у видов *P. spinulosum* и *P. thomii*, напротив, уменьшалась. Наиболее чувствительными к ионам фтора оказались грибы рода *Penicillium*.

Альгоценозы почв Кольского полуострова характеризуются низким видовым разнообразием и преобладанием одноклеточных зеленых водорослей, на долю которых приходится до 80 % от общего числа видов. Эта особенность характерна для хвойных лесов с подзолистым типом почвообразования (Алексахина, Штина, 1984) и подтверждена для почв под разными растительными микрогруппировками в сосновом и березовом лесах на территории заповедника «Пасвик» (Редькина, Шалыгина, 2015б; Евдокимова и др., 2016). В менее кислой почве под березовым лесом за 2 года исследований выявлено 50 видов водорослей и цианобактерий, в сосновом лесу обнаружено лишь 29 видов. Ведущим в структуре почвенного альгоценоза березового леса является отдел *Chlorophyta*

(60 % цианобактериально-водорослевого ценоза), также обнаружены диатомовые и желтозеленые водоросли. Высокую частоту встречаемости имели виды: *Tetracystis* cf. *aplanospora*, *Halochlorella rubescens*, *Pseudococcomyxa simplex*, *Fottea stichococcoides*, *Klebsormidium flaccidum*, *Hantzschia amphioxys*, *Microcoleus vaginatus*, *Aphanocapsa* sp.

Увеличение разнообразия микрофототрофов часто отмечается на сильно загрязненных территориях в условиях деградации высших сосудистых растений. Численность жизнеспособных клеток также может быть значительно выше, чем в почвах фоновых территорий, и подвержена более резким сезонным колебаниям. Так, на расстоянии до 2 км от Кандалакшского алюминиевого завода в верхнем слое нарушенной, лишенной растительного покрова и иссушенной почвы, при влажности всего 6–8 %, обилие водорослей достигало 8 млн. кл./г (Редькина, Шалыгина, 2015а). Развитию водорослей в импактной зоне КАЗ способствовало не только уменьшение конкуренции с высшими растениями за питательные вещества, но и снижение кислотности почвы в результате оседания на ее поверхность ряда элементов из промышленной пыли, оказывающих нейтрализующее действие. Помимо широко распространенных в почвах Кольского полуострова водорослей и цианобактерий *Klebsormidium flaccidum*, *Pseudococcomyxa simplex*, *Stichococcus bacillaris*, *Bracteacoccus minor*, *Interfilum terricola*, *Elliptochloris bilobata*, *Nostoc* spp., устойчивость к загрязнению почв фтор-содержащими соединениями алюминиевого завода проявляли виды: *Dictyochloris fragrans*, *Xanthonema exile*, *Botrydiopsis eriensis*, образующие скопления клеток, окруженные слизью. Был обнаружен слизиобразующий вид цианобактерий *Microcoleus vaginatus* и диатомовые водоросли, предпочитающие нейтральную реакцию среды и достаточную освещенность. Водоросли *Chlorella* sp., *Halochlorella rubescens*, *Neocystis* sp. не выявлены вблизи КАЗа, но встречены в почве, загрязненной тяжелыми металлами (Редькина, 2015). Широко распространенный вид почвенных водорослей *Eustigmatos magnus* проявил устойчивость к загрязнению фтором, но оказался чувствительным даже к слабому загрязнению тяжелыми металлами.

Альгологические исследования сотрудников лаборатории не ограничиваются лесными почвами. В 2015–2016 гг. были проанализированы различные типов почв тундровой зоны полуострова Рыбачий — крайне северной территории Мурманской области (Редькина, Шалыгина, 2016). Обнаружено 80 видов водорослей и цианобактерий, принадлежащих к 5 отделам, из которых наиболее представленными по числу видов оказались отделы *Chlorophyta* (31), *Ochrophyta* (25) и *Cyanobacteria* (18 видов). По возрастанию видового разнообразия альгофлоры можно выстроить следующий почвенный ряд: криогенные и примитивные почвы (по 6 видов) — Al-Fe-гумусовые подзолы (13) — подбуры (18) — сухо-торфяные почвы (39) — торфяно-болотные низинные почвы (53 вида). Последний тип почв также характеризуются самым высоким обилием водорослей. Представители трех основных групп водорослей — зеленые, диатомовые, синезеленые — имеют сходные доли в структуре альгофлоры торфяно-болотной почвы: 25, 28, 30 % от общего числа выявленных видов соответственно. Список зеленых водорослей пополнен видами из класса *Conjugatophyceae*, характерными для сильно увлажненных и водных местообитаний: *Cosmarium* cf. *impressulum*, *C. quadratum*, *Mougeotia* sp. Во всех повторностях образцов болотной почвы встречались цианопрокариоты *Microcoleus vaginatus*, *Geitlerinema* cf. *splendidum*, *Leptolyngbya* sp., *Pseudoanabaena* sp. Диатомовые были представлены

как мелкими, так и достаточно крупными формами: *Hantzschia amphioxys*, *Pinnularia* cf. *divergens*, *Pinnularia* cf. *brebissonii*, *Pinnularia* cf. *macilenta*, *Rhopalodia gibberula*, *Frustulia rhomboides*. Присутствовали и желто-зеленые водоросли.

Идентификация водорослей и цианобактерий требует тщательного анализа их морфологии и жизненного цикла в чистых культурах. Коллекция микробиологических культур, формируемая и поддерживаемая сотрудниками лаборатории, в настоящее время насчитывает до 200 штаммов. Это преимущественно зеленые водоросли (отдел Chlorophyta) и цианобактерии (Cyanobacteria), единичными видами представлены отделы харовые (Charophyta) и хромисты (Chromista). Некоторые штаммы цианобактерий из коллекции послужили объектами молекулярно-генетических исследований, проведенных в Университете Джона Кэрролла в США. Были получены сиквенсы участков генов 16S рРНК и 16S-23S ITS для 15 штаммов, выделенных из различных местообитаний Мурманской области. Предварительные результаты (филогенетические деревья по участку гена 16S рРНК и построение вторичной структуры 16S-23S ITS), а также данные по морфологии и экологии исследованных объектов позволяют предположить наличие среди них новых для науки видов цианобактерий. Так, в почве, загрязненной тяжелыми металлами в 5 км от комбината «Печенганикель», обнаружен новый вид рода *Stenomitos*. В последующем этот вид был выявлен и в почвах, загрязненных соединениями фтора. Использование полифазного подхода позволило выделить из почвы вблизи Кандалакшского алюминиевого завода новый вид рода *Nostoc*, устойчивый к загрязнению соединениями фтора (Шалыгина и др., 2016). Молекулярно-генетическими методами подтверждена таксономическая принадлежность нескольких видов рода *Nostoc*, а также вида *Microcoleus vaginatus*, выделенного из почвы заповедника «Пасвик». Предполагается описание нового вида рода *Wilmottia* sp., выделенного из криптогамных корочек в пределах Хибинского горного массива. Сиквенсы цианобактерий семейства Leptolyngbyaceae (предположительно виды родов *Nodosolinia* и *Muxacorus*) находятся на стадии обработки.

Заключение

Деятельность Лаборатории экологии микроорганизмов направлена на комплексное изучение всех основных групп микроорганизмов в различных природных и техногенных средах Мурманской области. Значительный объем ранее полученных данных постоянно пополняется результатами исследований микробиоты на физиологическом и генетическом уровнях с использованием современных методов. Это позволяет получить более полные сведения о микробиологических процессах, происходящих в субарктических экосистемах в настоящее время, и использовать их при ликвидации экологического ущерба от хозяйственной деятельности, а также для минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Новые знания о разнообразии и уникальных свойствах микроорганизмов заполярных широт будут способствовать усовершенствованию существующих и разработке новых эффективных биотехнологических приемов восстановления нарушенных территорий региона.

Основной объем работ выполнен в рамках государственных заданий: «Биологическая трансформация загрязнений в окружающей среде: закономерности и практические аспекты» (2010-2013 гг.) и «Исследование биотехнологического потенциала микроорганизмов в изменяющихся условиях природной среды Северной Фенноскандии» (2014–2017 гг.).

Исследования поддержаны грантообразующими организациями:

- Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития», подпрограмма «Биоразнообразие: состояние и динамика», проект «Биота тундровых почв Евро-Арктического региона»;
- грантом РФФИ № 09-05-00467 «Определение уровня токсичности почв в импактной зоне комбинатов «Карабашмедь» и «Североникель»;
- грантом РФФИ № 12-04-00547-а «Биологические аспекты современных почвенных процессов в условиях аэротехногенного воздействия алюминиевого предприятия»;
- международной программой Kolarctic SETIA, проект № КО 187 «Экология побережья, технологии и инновации в Арктике»;
- договором № 27-3-2012 с предприятием ОЛКОН «Микробиологические исследования сточных карьерных вод с целью разработки технологии их очистки от загрязняющих веществ группы азота до утвержденных нормативов допустимых концентраций» (2012 г.).

По результатам исследований защищено 4 диссертационные работы на соискание степени кандидата наук по специальностям «экология», «геоэкология», «почвоведение».

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность с.н.с. лаборатории Экологии микроорганизмов Н. П. Мозговой за помощь и ценные советы при проведении исследований; инженеру М. В. Пуговкиной за техническое обслуживание работ; руководству Оленегорского горно-обогатительного комбината (АО «Олкон») и ведущему инженеру по охране окружающей среды Т. М. Атавиной за содействие в практической реализации исследований лаборатории; администрации заповедника «Пасвик» в лице директора В. Е. Чижова и зам.директора по научной работе Н. В. Поликарповой за возможность проведения работ на территории заповедника; администрации филиала Всероссийского института растениеводства «Полярная опытная станция» (ПОСВИР) в лице Е. М. Ахтуловой и И. В. Михайловой.

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Физиолого-биохимические особенности и разнообразие микробиоты арктических природных сред и их биоремедиация при загрязнении», № гос. рег.: АААА-А18-118021490073-б.

Литература

Алексахина Т. И., Штина Э. А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 148 с.

Воронина Н. В., Евдокимова Г. А., Гершенков А. Ш. Развитие и функционирование микроорганизмов в цикле обогащения апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения // Горный журнал, 2007. № 12. С. 61–65.

Гайсина Л. А., Фазлутдинова А. И., Кабиров Р. Р. Современные методы выделения и культивирования водорослей. Учебное пособие. Уфа: Изд-во БГПУ, 2008. 152 с.

Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 272 с.

Евдокимова Г. А., Иванова Л. А., Мозгова Н. П., Мязин В. А., Фокина Н. В. Опыт по применению биоплато для очистки сточных карьерных вод в арктических условиях // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения / Матер. VI Всерос. науч. конф. с межд. участием. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. С. 27–31.

Евдокимова Г. А., Иванова Л. А., Мозгова Н. П., Мязин В. А., Фокина Н. В. Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях // Экология и промышленность России, 2015. Т. 19. № 9. С. 35–41.

Евдокимова Г. А., Иванова Л. А., Мязин В. А. Патент РФ № 2560631 «Устройство для биологической очистки сточных карьерных вод». Регистрационный номер заявки 2014122204 от 30 мая 2014 г. Регистрация в Государственном реестре изобретений РФ 22 июля 2015 г. Срок действия патента — до 30 мая 2034 г.

Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Мозгова Н. П., Мязин В. А., Фокина Р. В. Очищение почв от нефтепродуктов в Евро-Арктическом регионе России // Роль почв в биосфере и жизни человека / Матер. докл. Межд. науч. конф. Москва: МГУ, 2015. С. 45–47.

Евдокимова Г. А., Маслобоев В. А. Биоремедиация загрязненных нефтепродуктами почв в условиях Кольского Севера // Мурманшельфинфо, 2011. № 2 (15). С. 34–38.

Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П. Микрофлора почв тундровой зоны Кольского полуострова // Почвоведение, 1995. № 12. С. 1487–1497.

Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Михайлова И. В. Способы биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении дизельным топливом // Агрохимия, 2009. № 6. С. 61–66.

Кондакова Л. В., Домрачева Л. И. Флора Вятского края. Часть 2. Водоросли (Видовой состав, специфика водных и почвенных биоценозов). Киров: «Кировская областная типография», 2007. 192 с.

Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Лебедева Е. В. Комплексы микроскопических грибов в загрязненных нефтепродуктами агроземах Кольского полуострова // Микология и фитопатология, 2011. Т. 45, № 3. С. 249–256.

Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Лебедева Е. В. Комплексы потенциально патогенных микроскопических грибов в антропогенно-загрязненных почвах Кольского Севера // Микология и фитопатология, 2012. Т. 46. № 5. С. 323–328.

Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Лебедева Е. В., Чапоргина А. А. Комплексы микроскопических грибов воздушной среды антропогенно-загрязненных территорий Кольского Севера // Микология и фитопатология, 2015. Т. 49. № 4. С. 218–225.

Корнейкова М. В., Лебедева Е. В. Потенциальная патогенность микромицетов, выделенных из антропогенно загрязненных и фоновых почв Кольского полуострова // Биология, систематика и экология грибов и лишайников в природных экосистемах и агрофитоценозах / Матер. II Межд. науч. конф. Минск: Колорград, 2016. С. 133–139.

Лабинская А. С. Микробиология с техникой микробиологических исследований. М.: Медицина, 1978. 394 с.

Маслобоев В. А., Евдокимова Г. А., Губкина Т. Г., Мязин В. А., Фокина Н. В., Украинская К. В. Биоремедиация загрязненных нефтепродуктами почв в субарктическом регионе // Проблемы безопасности и эффективности освоения

георесурсов в современных условиях: Материалы научно-практической конференции, посвященной 25-летию Горного института Уро РАН и 75-летию чл.-корр. РАН А. Е. Красноштейна. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2014. С. 146–149.

Мязин В. А. Определение остаточного содержания углеводов и продуктов их трансформации при загрязнении окультуренных подзолистых почв в Евро-Арктическом регионе // Вестник Кольского Научного Центра РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. № 1 (20). С. 126–131.

Паринкина О. М. Микрофлора тундровых почв. Л.: Наука, 1989. 159 с.

Редькина В. В. Водоросли и цианобактерии почв, испытывающих влияние газовоздушных выбросов комбината Печенганикель (п. Никель, Мурманская область) // Тезисы докладов III (XI) Международной Ботанической конференции молодых ученых. СПб.: БИН РАН, 2015. С. 54.

Редькина В. В., Шалыгина Р. Р. Влияние газо-воздушных выбросов алюминиевого завода на почвенные альгоценозы // Водоросли и цианобактерии в природных сельскохозяйственных экосистемах / Матер. II между. науч.-практ. конф. Киров: Вятская ГСХА, 2015а. С. 234–237.

Редькина В. В., Шалыгина Р. Р. Почвенные водоросли под различными компонентами растительных сообществ на территории заповедника «Пасвик». // Там же, 2015б. С. 238–242.

Редькина В. В., Шалыгина Р. Р. Предварительные результаты исследования цианобактериально-водорослевых ценозов в почвах полуострова Рыбачий. // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения / Матер. VI Всерос. науч. конф. с между. участием. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. С. 142–144.

Фокина Н. В. Исследование влияния высокого содержания нефтепродуктов в почве на бактерии в лабораторном опыте // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения / Доклады III-ей Всероссийской научной конференции с международным участием. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 49–52.

Фокина Н. В., Янишевская Е. С., Евдокимова Г. А. Сезонная динамика численности и трофическое разнообразие микроорганизмов в процессе флотации сульфидных медно-никелевых руд на обогатительной фабрике Кольской ГМК // Проблемы недропользования, 2016. № 2. С. 118–122.

Чапоргина А. А., Корнейкова М. В. Биотрансформация углеводов нефти активными штаммами микромицетов, выделенными из почв Кольского полуострова // Материалы II Международной научной конференции. Минск: Колорград, 2016. С. 257–260.

Чапоргина А. А., Корнейкова М. В. Комплексы микроскопических грибов воздуха и почвы в зоне воздействия выбросов Кандалакшского алюминиевого завода // Проблемы арктического региона / Труды 14-й Международной научной конференции студентов и аспирантов. Мурманск, 2014. С. 136–142.

Шалыгина Р. Р., Шалыгин С. С., Редькина В. В. Морфологическая и молекулярная характеристика цианобактерии *Nostoc* sp., изолированной из почвы Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 4, 7/2016 (41). С. 78–89.

Evdokimova G. A., Masloboev V. A., Mozgova N. P., Myazin V. A., Fokina N. V. Bioremediation of Oil-Polluted Cultivated Soils in the Euro-Arctic Region // Environmental Science and Engineering, 2012. 1(9): 1130–1136.

Kotai J. Instructions for preparation of modified nutrient solution Z8 for algae. Norwegian Institute for Water Research, 1972. Publication B-11/69. Oslo, Blindern. 5 p.

Olsen R. A., Hovland J. Fungal flora and activity in Norway spruce needle litter. // Report Department of Microbiology, Agricultural University of Norway. 1985. 41 p.

Сведения об авторах

Корнейкова Мария Владимировна,

Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией Экологии микроорганизмов Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН с 2017 г., Апатиты; korneykova.maria@mail.ru

Евдокимова Галина Андреевна,

Доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией Экологии микроорганизмов Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ в 1992-2017 гг., Апатиты, galina_evdokimova@list.ru

Мязин Владимир Александрович,

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; myazin@mail.ru

Редькина Вера Вячеславовна,

Кандидат биологических наук, ведущий инженер Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; kalmykova_v_v@mail.ru

Фокина Надежда Викторовна,

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; nadezdavf@yandex.ru

Шалыгина Регина Ринатовна,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; regina_rinat@mail.ru

Чапоргина Александра Александровна,

Аспирант, старший лаборант Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; sashka-26.11.91@mail.ru

Янишевская Елена Сергеевна,

Аспирант, старший лаборант Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; drygina_es@mail.ru

Korneykova Maria Vladimirovna,

PhD (Biology), Head of Microorganisms Ecology Laboratory from 2017, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; korneykova.maria@mail.ru

Evdokimova Galina Andreevna,

Dr. of Sci. (Biology), Professor, Head of Microorganisms Ecology Laboratory in 1992-2017, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; galina_evdokimova@list.ru

Myazin Vladimir Aleksandrovich,

PhD (Biology), Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; myazin@mail.ru

Red'kina Vera Vyacheslavovna,

PhD (Biology), Lead Engineer of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; kalmykova_v_v@mail.ru

Fokina Nadezhda Viktorovna,

PhD (Engineer), Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; nadezdavf@yandex.ru

Shalygyna Regina Rinatovna,

PhD (Biology), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; regina_rinat@mail.ru

Chaporgina Aleksandra Aleksandrovna,

PhD Student, Senior laboratory assistant researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; sashka-26.11.91@mail.ru

Yanishevskaya Elena Sergeevna,

PhD Student, Senior laboratory assistant researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; drygina_es@mail.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.104-160

УДК 622.7.017+504.05+666.3

**Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев, Л. Б. Кошкина, Л. П. Сулименко, А. В. Светлов,
Т. А. Мингалева, Ю. Л. Денисова, Е. А. Красавцева**

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,
Лаборатория Экологии промышленного производства*

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ СНИЖЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ОТХОДОВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Аннотация

Рассмотрены основные результаты научно-исследовательской работы Лаборатории экологии промышленного производства ИППЭС КНЦ РАН за период 2012-2017 г.г. Главные направления исследований: снижение экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса, доизвлечение из них цветных металлов и попутное получение строительных материалов, защита природных водоемов от промышленных стоков и очистка сточных вод. Обсуждены результаты и перспективы развития исследований.

Ключевые слова:

отходы горнопромышленного комплекса, тяжелые металлы, геотехнологии, очистка сточных вод, геохимические барьеры, сорбенты, строительные материалы.

**D. V. Makarov, V. A. Masloboev, L. B. Koshkina, L. P. Sulimenko, A. V. Svetlov,
T. A. Mingaleva, Y. L. Denisova, E. A. Krasavtseva**

SUBSTANTIATION OF RESEARCH ON THE REDUCTION OF ECOLOGICAL DANGER FROM MINING WASTE: MAIN RESULTS AND PERSPECTIVES OF INVESTIGATIONS

Abstract

The main results of research of the «Laboratory of ecology of industrial production» in 2012–2017 are analyzed in major directions – reduction of pollution effect of mining wastes to the environment, re-extraction of non-ferrous metals and receiving by-product materials for construction, natural water bodies protection, and wastewater purification. Results and perspectives of research are discussed.

Введение

В 1973 году в составе Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского филиала АН СССР была организована Лаборатория адсорбционных и вяжущих материалов, которую в 1975 году возглавил к.т.н. Анатолий Петрович Зосин. При переходе в Институт проблем промышленной экологии Севера КФ АН СССР, основанный в 1989 году, подразделение было преобразовано в Лабораторию экологии промышленного производства, основным направлением деятельности которой стала разработка концепции экологически чистого промышленного природопользования в условиях Субарктики.

В рамках работы по этому направлению сотрудниками лаборатории были выявлены адсорбционно-активные свойства твердотельных минеральных дисперсий (ТМД), содержащих различные по минеральному составу дисперсоиды и неорганические дисперсивы. На основе технологии ТМД синтезированы сорбенты для дефторирования и очистки промышленных стоков от катионов тяжелых и цветных металлов. Разработана технология геополимерного вяжущего — сорбента для иммобилизации и захоронения экологически опасных веществ, в том числе жидких радиоактивных отходов. Создан новый класс органо-минеральных соединений с гиперкоординацией ряда катионов в матрице слоистого силиката, так называемые «Вермосы», и исследованы области применения материалов на их основе. Отработаны различные способы прививки катиона-модификатора, позволяющие варьировать свойства сорбентов в широких пределах. Области применения синтезированных материалов включают: очистку природных и сточных вод от нефтепродуктов и других загрязняющих органических примесей; осушку воздуха в системах низкотемпературной консервации; очистку воздуха и газовых смесей от органических примесей и их дезодорацию; кондиционирование условий длительного хранения и транспортировки различных видов сельскохозяйственной продукции.

Основное направление исследований лаборатории в настоящее время — выявление наиболее значимых механизмов загрязнения окружающей среды в результате гипергенных процессов, происходящих в складированных отходах горнопромышленного комплекса в условиях Субарктики, и разработка методов, снижающих негативное воздействие отходов на окружающую среду. В рамках этого направления требуется решить следующие задачи:

- разработать способы снижения экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса;
- предложить технологии доизвлечения из них ценных компонентов и попутного получения строительных и технических материалов;
- разработать методы защиты природных водоемов и очистки сточных вод от загрязнения тяжелыми металлами с использованием модифицированных природных и искусственных геохимических барьеров и сорбентов на основе местного сырья и промышленных отходов.

Мурманская область, территория которой расположена в арктической зоне Российской Федерации, — один из наиболее развитых горнорудных районов страны (Доклад ..., 2016). Она обеспечивает преобладающую часть потребности России в фосфатных рудах, флогопите и вермикулите, циркониевом сырье

(бадделейте), ниобии, тантале, редкоземельных металлах. Здесь ведется добыча никеля, меди, кобальта, нефелинового и керамического сырья, железных и хромовых руд, облицовочного камня и строительных материалов. На базе разведанных месторождений действуют горно-обогатительные предприятия, являющиеся градообразующими для основных населенных пунктов: Апатиты, Кировск (АО «Апатит», ЗАО «СЗФК»), Заполярный, Никель, Мончегорск (АО «Кольская ГМК»), Оленегорск (АО «Олкон»), Ковдор (АО «Ковдорский ГОК», ООО «Ковдорслюда»), Ревда (ООО «Ловозерский ГОК»), в которых проживает треть населения Мурманской области. Продукция Кольского горно-рудного комплекса составляет свыше 60 % промышленного производства области.

Вместе с тем, многолетняя деятельность горно-металлургических предприятий региона вызвала деградацию окружающей среды в зонах их действия, истощение природных ресурсов, обусловила неблагоприятную экологическую обстановку на территориях прилегающих городов и поселков. Ежегодно в области складывается более 150 млн т отходов, общий объем которых к настоящему времени достиг около 8 млрд т. Из этого объема забалансовые и попутные руды, уложенные в отвалы, составляют 2.4 %, породы вскрыши и проходки (скальные и моренные) — 72.4 %, хвосты обогащения — около 24 %; остальную долю (до 1.5 %) составляют шлаки и золы (Masloboev et al., 2016).

Сотрудничество с промышленными предприятиями и проектными организациями в научно-исследовательской области и в области инженерных изысканий составляет важную часть деятельности лаборатории. Ежегодно коллектив выполняет научно-исследовательские работы (НИР) по заказу этих предприятий. К числу НИР, выполненных за последние годы, относятся следующие: «Сквозное исследование содержания молибдена в водных объектах зоны деятельности АО «Апатит» и проведение ихтиологического обследования на озере Большой Вудъявр» (2014 г., заказчик — АО «Апатит»); «Мониторинг и оценка эффективности закрепления пылящей поверхности хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит» различными связующими реагентами» (2015 г., заказчик — АО «Апатит»); «Определение источников повышения сульфатов и влияния эмульсионных взрывчатых веществ на концентрации азотной группы в откачиваемой шахтной воде рудника «Северный» АО «Кольская ГМК» (2016 г., заказчик — АО «Кольская ГМК»).

В 2013 году ИППЭС КНЦ РАН при ведущей роли лаборатории Экологии промышленного производства по заказу ООО «СПб-Гипрошахт» провел инженерно-экологические и инженерно-гидрометеорологические изыскания в зоне деятельности ряда структурных подразделений предприятия АО «Воркутауголь»: шахт «Заполярная», «Воркутинская», «Северная» и обогатительной фабрики «Печорская ЦОФ».

В том же году сотрудниками лаборатории совместно с лабораторией Экологии микроорганизмов ИППЭС КНЦ РАН проведена НИР «Выполнение комплекса работ по выявлению причин ухудшения водно-химического режима работы тепловых сетей Апатитской ТЭЦ, сетей системы теплоснабжения городов Апатиты и Кировска для Апатитской ТЭЦ филиала «Кольский» ОАО «ТГК-1» (заказчик – филиал «Кольский» ОАО «ТГК-1»).

Указанные изыскания и НИР выполнены качественно в установленные сроки.

В рамках Госзадания на протяжении последних лет коллектив лаборатории выполняет исследования по следующим тематикам НИР: «Разработка эколого-технологических принципов создания конкурентоспособных промышленных кластеров в условиях Субарктики на основе формирования устойчивого локального техногенеза» (2010–2012 гг.), «Обоснование методов снижения экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса с доизвлечением цветных металлов из техногенного сырья» (2011–2013 гг.) и «Разработка стратегии минимизации техногенных воздействий на природные воды в процессе складирования дезинтегрированных отходов горнопромышленного комплекса» (2013–2017 гг.).

В рамках Программ фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Фундаментальный базис инновационных технологий прогноза, оценки, добычи и глубокой комплексной переработки стратегического минерального сырья, необходимого для модернизации экономики России» и «Месторождения стратегического минерального сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче» коллектив лаборатории проводил работы по проектам: «Теоретическое и экспериментальное обоснование интенсификации комбинированных обогатительно-гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сульфидного сырья» (2013–2014 гг.) и «Теоретическое и экспериментальное обоснование физико-химических геотехнологий переработки сырья природных и техногенных медно-никелевых месторождений Мурманской области с доизвлечением стратегических цветных металлов и снижением нагрузки на окружающую среду» (2015–2017 гг.) под научным руководством д.т.н., профессора В. А. Маслобоева. В 2014–2016 гг. сотрудники лаборатории принимали участие в исследованиях по проекту РФФИ № 14-05-98804 р_север_а «Теоретическое обоснование и разработка комбинированных методов доизвлечения цветных металлов из сульфидсодержащих отходов горнометаллургического комплекса на основе изучения минералого-технологических особенностей их состава» (научный руководитель – д.т.н. Д. В. Макаров).

Содержание и результаты этих работ раскрыты в настоящей статье.

Изучение гипергенных процессов при хранении отходов горнопромышленного комплекса

Накопление отвальных пород, шлаков, хвостов обогащения руды создают серьезные экономические и экологические проблемы в горнопромышленных районах. Поддержание отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ требует значительных капитальных и материальных затрат. Большие объемы перемещенной горной массы нарушают сложившееся геологическое равновесие. Выбросы газа и пыли при добыче полезных ископаемых, пыление отвалов и хвостохранилищ, попадание реагентов и тяжелых металлов в природные поверхностные и подземные воды отрицательно воздействуют на сложившиеся экосистемы и здоровье человека. Особенно опасно это воздействие в районах с экстремальными климатическими условиями, где вблизи горнодобывающих предприятий возникают обширные техногенные пустыни (Чантурия и др., 2005; Маслобоев и др., 2014).

Согласно определению академика А. Е. Ферсмана, гипергенез — это поверхностные изменения пород и минералов в коре выветривания и биосфере

(Геологический ..., 1973). Исключительная роль в геохимических процессах гипергенеза принадлежит деятельности человека, которую А. Е. Ферсман предложил именовать техногенезом (Ферсман, 1934, 1937). Прежде всего, это — добыча и переработка полезных ископаемых. Влияние этого фактора многократно возросло в настоящее время (Пучков, Воробьев, 2000).

Зона гипергенеза характеризуется сложным химическим и физическим взаимодействием атмосферы, гидросферы и верхних частей литосферы, исключительным постоянством факторов, определяющих ход биохимических и химических реакций. Специфика геохимических процессов определяется сочетанием многокомпонентных систем и сред, каковыми являются литосфера, гидросфера, атмосфера и живые организмы, проявлением эндогенных и экзогенных факторов. Для зоны гипергенеза характерны разнообразные геохимические реакции: окисление и восстановление, гидролиз и выщелачивание, гидратация и дегидратация, коллоидный обмен и замещение, коагуляция и пептизация, вынос одних соединений и элементов и аккумуляция других, метасоматические, диагенетические и другие физико-химические изменения горных пород и минералов, синтез новых минеральных и органических соединений (Лукашев, 1963).

В последние десятилетия концепция гипергенеза пополнилась рядом новых разработок (Яхонтова, Зверева, 2000), в их числе:

- становление коррозионной модели развития гипергенеза, которая сложилась на основе электрохимических исследований арсенидов, сульфоарсенидов и многих сульфидов;
- вывод корректных уравнений реакций окисления минералов с целью прогноза реального состояния продуцируемых растворов, миграции элементов и их участия в гипергенной и техногенной минерализации, а также оценки негативных экологических последствий;
- выявление количественных причинно-следственных связей в цепочке факторов: геоморфология региона — динамика подземного стока — химизм и рН вод — зональность и тип гипергенной минерализации;
- закон энергетической направленности гипергенных процессов;
- обоснование роли бактериального фактора в развитии гипергенеза.

Исследования гипергенеза при хранении отходов горнопромышленного комплекса проводятся с использованием широкого комплекса экспериментально-аналитических методов: гидрогеологических, инженерно-геологических, геохимических, минералого-геохимических, физико-химических и физических. Предварительная информация содержит минералогические и геохимические характеристики отвалов и хвостохранилищ, перечень операций при складировании отходов, список флотационных реагентов, используемых в процессе обогащения. Важными компонентами являются региональные геологические, гидрогеологические, гидрологические и климатические данные, а также экологические аспекты. Оценка техногенных объектов, таким образом, должна быть технолого-эколого-экономической (Талалай и др., 1997; Макаров, Талалай, 1999).

Сульфидсодержащие отходы горнопромышленного комплекса относятся к группе наиболее экологически опасных. При добыче и обогащении руд цветных металлов теряется до 15 % меди, молибдена, свинца, до 25 % цинка и никеля, до

40 % кобальта. Присутствующие в составе отходов сульфиды этих металлов, а также сульфиды железа, содержащие цветные металлы в виде изоморфных примесей, в процессе хранения окисляются, тяжелые металлы переходят в водорастворимые соли (Калинников и др., 1997; Бортникова и др., 2003; Чантурия и др., 2005; Маслобоев и др., 2014; Doyle, 1990). Гипергенные изменения техногенных продуктов протекают значительно быстрее, чем в естественных геологических условиях. Одним из факторов, интенсифицирующих процессы гипергенных изменений, является активация поверхности минералов, протекающая при их дроблении и измельчении.

Изучение разновозрастных хвостов обогащения медно-никелевых руд на хвостохранилищах Мурманской области показало, что окисление сульфидных минералов начинается уже на стадии складирования и ранних этапах хранения. С увеличением времени хранения хвостов происходит накопление в растворах цветных металлов и магнезия; кальций частично выпадает в осадок в виде гипса (Чантурия и др., 2005; Макаров и др., 2005а; 2006а). При хранении вследствие гипергенных процессов меняется не только содержание металлов в хвостах, но и их форма — соотношение сульфидной и кислородсодержащих фаз. Так, соотношение силикатной и сульфидной форм никеля перераспределяются в пользу первой (Чантурия и др., 2004б). Несмотря на наличие в составе хвостов обогащения медно-никелевых руд гидросиликатов магнезия и железа типа серпентинов и гидрохлоритов, присутствие карбонатов и низкое содержание сульфидов, хранилища хвостов представляют угрозу для окружающей среды.

При наличии химически активных нерудных минералов концентрации тяжелых металлов в поровых растворах существенно снижаются, а величина рН растет, однако остаточные содержания металлов в водной фазе лежалых хвостов превосходят ПДК для рыбохозяйственных водоемов: по никелю в среднем в 486 раза, по меди — в 394, по кобальту — в 102. После завершения эксплуатации объекта эта ситуация сохраняется длительное время, и даже ухудшается (Чантурия и др., 2005; Макаров и др., 2006а).

Установлено, что гипергенные воздействия приводят к значительному изменению технологических свойств как рудных, так и нерудных минералов: снижению флотоактивности сульфидов, увеличению потерь полезных компонентов с водорастворимой формой в камерном продукте, ухудшению селективности процесса, повышению расхода флотореагентов (Чантурия и др., 2000, 2002). В этой связи сотрудниками лаборатории продолжены исследования гипергенеза минералов в сульфидсодержащих техногенных образованиях (ТО) нашего региона.

Гипергенез минералов отвала Аллареченского месторождения медно-никелевых руд и оценка экологической опасности техногенного объекта

ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» (рис. 1а) расположено в Печенгском районе Мурманской области и представляет отвал горных пород — отходов добычи коренного Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд, разработка которого велась открытым способом и была завершена в 1971 году. Основными полезными ископаемыми месторождения были никель, медь и кобальт.



Рис. 1. Отвал Аллареченского месторождения медно-никелевых руд в Печенгском районе Мурманской области:
 а — общий вид отвала; б — отбор проб воды затопленного карьера;
 в — техногенная пустошь вблизи подошвы отвала

Породы отвала представлены вскрышными, преимущественно безрудными гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами и в разной степени оруденелыми вмещающими породами: перидотитами, оливинитами, контактовыми амфиболитами и др. Их общий объем оценивается в 6,7 млн м³ или более чем в 12 млн т. Состав мелкозернистой фракции определяют раздробленные в процессе взрывных работ вмещающие и вскрышные породы, вскрышные четвертичные флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения (Макаров, 1998; Селезнев и др., 2013; Маслобоев и др., 2014).

Руды отвала представлены двумя морфологическими типами: массивными и вкрапленными. Основными рудными минералами обоих типов являются: пирротин $Fe_{1-x}S$, пентландит $(Ni,Fe)_9S_8$, реже халькопирит $CuFeS_2$, которые находятся в тесной парагенетической связи с магнетитом. Атмосферные воздействия, оказываемые на первичные руды в период их длительного нахождения в породном отвале, и связанные с ними гипергенные процессы привели к появлению окисленных руд. В результате окисления значительная часть руды потеряла свои первоначальные качества. Так, если в богатых разновидностях первичных руд содержание полезных компонентов достигает, %: Ni — 18, Cu — 8, Co — 0,3, то в их окисленных аналогах максимальные обнаруженные содержания не превысили 3,3, 2,0 и 0,05 % соответственно (Селезнев и др., 2013; Маслобоев и др., 2014).

Особенно подвержены гипергенезу массивные руды пирротин-пентландитового ряда из-за неустойчивости основных слагающих их минералов, что наблюдается визуально — обломки этих руд покрываются корочкой гидроксидов железа, отшелушиваются и рассыпаются. Помимо физического разрушения в рудах постоянно протекают химические реакции. В процессе пробоподготовки вкрапленных руд к лабораторным исследованиям было отмечено выделение микро-капель серной кислоты, которая, видимо, резервируется в порообразующих силикатах вокруг сульфидных зерен. В результате химических изменений в рудах появляются характерные гипергенные минералы: ковеллин CuS , самородная медь, виоларит $(Ni,Fe)_3S_4$, ретгерсит $\alpha-NiSO_4 \cdot 6H_2O$ и подобные ему. В рудах постоянно присутствует виоларит. Его средний химический состав, по данным микронзондовых анализов, включает, %: Fe — 21,0, Ni — 35,3, Co — 0,8, S — 42,6, т.е. соответствует формуле $(Ni_{1.52}Fe_{1.14}Co_{0.04})_{3.00}S_{4.00}$. О гипергенном происхождении этого минерала свидетельствует очень близкий, к определенному для пентландита, показатель

соотношения Ni/Co, что объясняется замещением пентландита виоларитом. Под электронным микроскопом виоларит часто наблюдается в сростках с гетитом α -FeOOH и обладает многочисленными трещинами, что свидетельствует о дефиците объема в результате выноса железа (Селезнев и др., 2013; Маслобоев и др., 2014).

Отмечается повсеместное распространение ретгерсита, который образует хорошо заметные сине-зеленые налеты на вмещающих породах, частично аккумулируется в мелкозернистой фракции и, вследствие своей легкой растворимости, выносится вместе с атмосферными осадками и паводковыми водами в нижние горизонты и за пределы отвалов. В качестве примера приведем данные рентгенофазового анализа (РФА) налета на образце массивной пирротин-пентландитовой руды (рис. 2). Основная сульфатная фаза представлена гипсом, присутствуют сульфаты никеля, кобальта и магния. Съемка в камере Дебая голубого налета на поверхности одного из образцов сплошной сульфидной руды позволила диагностировать основной сульфат меди – лангит $Cu_4SO_4(OH)_6 \cdot 2H_2O$.

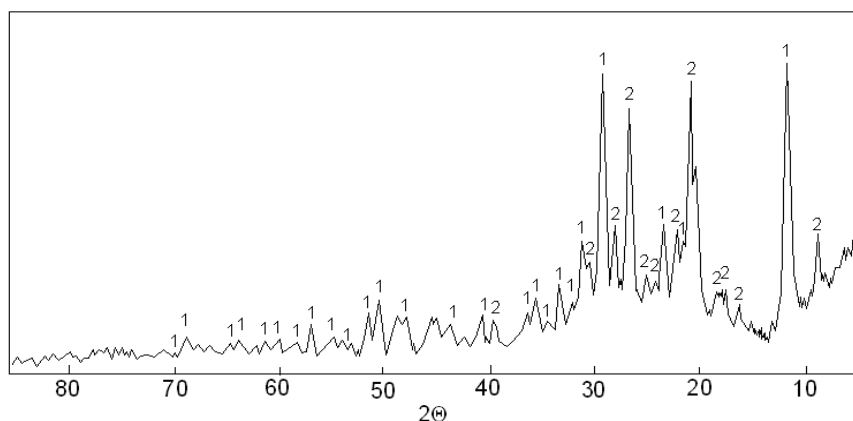
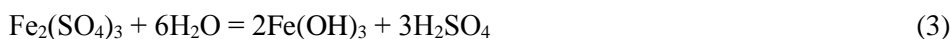
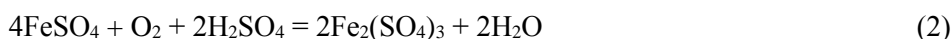


Рис. 2. Дифрактограмма сульфатного налета на образце массивной пирротин-пентландитовой руды (по: Селезнев и др., 2013). Цифрами обозначены рефлексy: 1 — гипса; 2 — сульфатных фаз (гексагидрит $MgSO_4 \cdot 6H_2O$, никельгексагидрит α - $NiSO_4 \cdot 6H_2O$, ретгерсит α - $NiSO_4 \cdot 6H_2O$, мурхаусит $CoSO_4 \cdot 6H_2O$, биверит $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ и др.)

Сопоставление химического состава первичных и новообразованных минералов позволяет предполагать следующую последовательность процессов выветривания в сплошных сульфидных рудах (Макаров, 1998). Первоначально происходит окисление наименее устойчивого минерала — пирротина с образованием свободной серной кислоты, которая воздействует как на сам пирротин, так и на ассоциирующие с ним минералы, в частности, пентландит:



Учитывая, что в подобных рудах практически нет силикатов и других нерудных минералов, можно предположить, что образующаяся при окислении пирротина серная кислота полностью расходуется на превращение пентландита

в виоларит (рис. 3). Объем новообразованной твердой фазы в этом случае не превышает 22 % от объема исходных твердых фаз. Таким образом, этот процесс приводит к увеличению пористости, что повышает скорость выветривания.

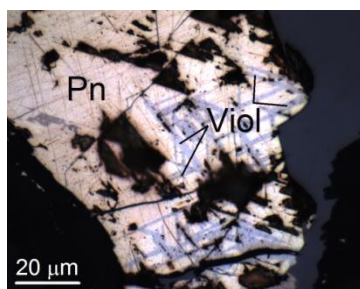
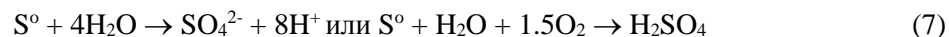
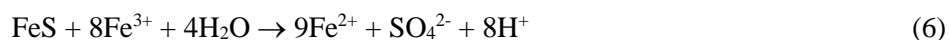
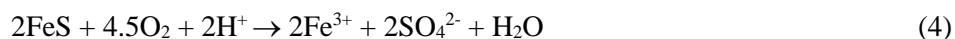
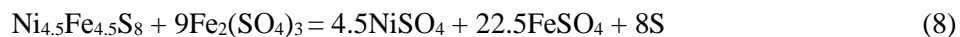


Рис. 3. Формы нахождения виоларита. Развитие виоларита по спайности пентландита (отраженный свет): Pn — пентландит; Viol — виоларит (по: Маслобоев и др., 2014)

Немаловажную роль в процессах разрушения руд играет естественное бактериальное выщелачивание. В обычных условиях реакция (2) протекает медленно, но в присутствии микроорганизмов скорость окисления FeSO_4 возрастает в десятки тысяч раз, ускоряя процесс разрушения сульфидов. Несмотря на географическую приуроченность объекта исследования (ТО) к арктической зоне, в пробах воды и в рудах были обнаружены тионовые ацидофильные железо- и сероокисляющие бактерии. В основе жизнедеятельности железоокисляющих бактерий лежит их способность к окислению Fe^{2+} до Fe^{3+} . Реакция бактериального окисления пирротина осуществляется по следующей схеме (Адамов, Панин, 2008):



С участием микроорганизмов реализуется реакция (2). Сульфат трехвалентного железа также является сильным окислителем сульфидов:



Однако в настоящее время многими исследователями отмечается превалирующая роль бактериального фактора в процессах гипергенного окисления сульфидных минералов (Яхонтова, Зверева, 2000).

С целью оценки скорости гипергенеза сульфидных минералов, а также возможностей применения кучного или чанового выщелачивания нами были проведены две серии эксперимента.

В первой серии изучали взаимодействие руды фракции $-3+2$ мм с выщелачивающим реагентом в динамическом режиме в колонках диаметром 40 мм при температуре $+18 \pm 2$ °C в течение 90 суток. Руда данной фракции содержала, %: Ni — 0,52, Cu — 0,74, Co — 0,012. В качестве реагентов использовали 2% раствор серной кислоты и такой же раствор с добавкой окислителя (ионы Fe^{3+}). Расход окислителя составлял 80 г/т руды. Использовали предварительное влагонасыщение руды. Опыты с оборотом растворов на данном этапе не проводили. Загрузка руды составляла 150 г. Кислоту в количестве 10 мл подавали раз в 3–4 дня. Растворы на выходе из колонок анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе AAnalyst 400 PerkinElmer.

Наиболее интенсивно, как и ожидалось, из образцов руды выщелачивался никель (рис. 4). Существенно более медленно в раствор переходила медь, что объяснялось низкой скоростью растворения халькопирита, относящегося к «упорным» сульфидам (Вигдергауз и др., 2008).

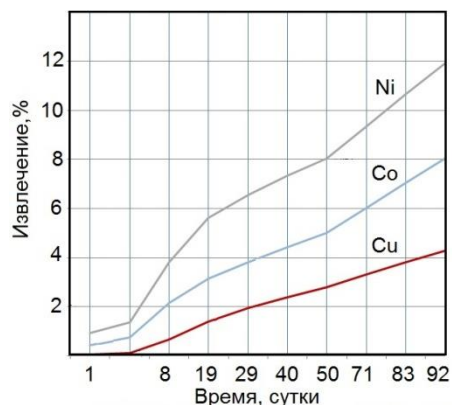


Рис. 4. Кинетика выщелачивания металлов (никеля, кобальта и меди) из руды ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» раствором серной кислоты

За 90 суток выщелачивания раствором без окислителя извлечения металлов составили, %: Ni — 11,9, Cu — 4,3, Co — 8,0; с окислителем — 11,8, 4,0, 7,9 % соответственно. Очевидно, что введение в раствор окислителя не привело к улучшению извлечения металлов. Это можно объяснить образованием окислителя Fe^{3+} в ходе протекания реакций (1–8) при выщелачивании кислотой в количествах, достаточных для интенсификации процесса растворения цветных металлов.

Эксперименты показали, что руды ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» приемлемы для кучного или чанового выщелачивания цветных металлов, однако необходим поиск оптимальных технологических решений, обеспечивающих интенсификацию процессов растворения сульфидных минералов.

Во второй серии опытов было проведено моделирование гипергенеза в ускоренных условиях: в режиме попеременного увлажнения — высыхания руды фракции $-3+0$ мм при температуре $+45 \pm 2$ °C в течение 30 суток (Халезов, 2009). Руда данной фракции содержала, %: Ni — 0,35, Cu — 0,33, Co — 0,02. Навеска руды равнялась 60 г. Увлажнение руды производили 4 раза в сутки дистиллированной водой (по 10 мл), 2 % раствором серной кислоты (по 10 мл раствора) и тем же раствором с добавлением ионов Fe^{3+} в качестве окислителя, расход которого составлял 80 г/т руды, как и в первой серии опытов. По окончании опытов проводили выщелачивание образцов дистиллированной водой при комнатной температуре в течение 4 часов при перемешивании со скоростью 500 $мин^{-1}$. Соотношение твердой и жидкой фаз составляло 1:5. Растворы выщелачивания анализировали методом ААС (AAnalyst 400 PerkinElmer). Твердую фазу исследовали методами рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-2 (излучение $Cu K\alpha$) и ИК спектроскопии.

В отличие от опытов с дистиллированной водой, при увлажнении — высыхании сернокислых растворов пробы руды уже на вторые сутки покрылись зеленовато-желтой коркой новообразованных фаз, которая препятствовала проникновению реагентов вглубь образца руды при последующих циклах

обработки, поэтому образцы перемешивали. Подобные процессы самоконсервации наблюдаются на сульфидсодержащих хвостохранилищах со значительными сроками складирования и связаны с образованием кварц-сульфатных корок (Белогуб и др., 2007).

ИК спектры исходной руды, новообразованной фазы и руды после обработки серной кислотой в режиме увлажнения — высыхания представлены на рисунке 5. Спектры качественно схожи, что свидетельствует о протекании процессов гипергенеза мелкодисперсной фракции руды при ее хранении в отвале. К отличиям можно отнести увеличение интенсивности полос поглощения, отвечающих валентным и деформационным колебаниям ОН-групп гидратной воды сульфатов, а также оксигидроксидов, вероятно, железа при переходе от исходной руды к новообразованной фазе (полосы при 3575, 3385, 1652, 1116, 1000, 874, 629, 592 см^{-1} , рис. 5в). Полосы при 1140, 1116, 1078, 985, 670, 629 и 592 могут быть отнесены к колебаниям сульфат-иона (рис. 5в).

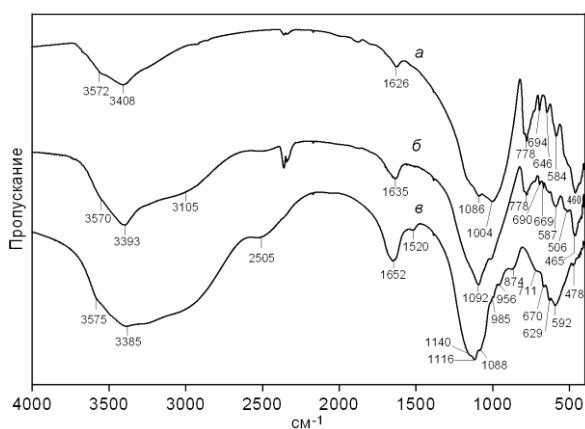


Рис. 5. ИК спектры руды ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» (по: Селезнев и др., 2013): а — исходная руда, б — руда после обработки раствором серной кислоты в режиме увлажнения – высыхания, в — новообразования на поверхности руды

Анализ растворов выщелачивания позволил рассчитать переход цветных металлов в растворимые формы. Извлечения металлов в раствор составили для Ni, Cu и Co, %:

- в опыте с дистиллированной водой: 2,19; 0,02; 1,67;
- с серной кислотой: 18,15; 11,49; 8,19;
- с серной кислотой и окислителем: 19,92; 11,73; 8,94.

Таким образом, зафиксировано существенное увеличение перехода цветных металлов в растворимые формы при обработке руды выщелачивающими реагентами. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке экологической опасности ТО. Отсутствие в составе руды химически активных нерудных минералов, способных нейтрализовать серную кислоту, образующуюся вследствие процессов (1–8), а также выпадение кислотных дождей в регионе резко увеличивают скорость гипергенных изменений сульфидных минералов и переход экологически опасных элементов в подвижные формы. Диагностированные минеральные фазы, образовавшиеся в лабораторных опытах, в основном соответствуют зафиксированным на ТО вторичным минералам, что позволяет применить данную методику для оценки скорости химического выветривания сульфидных минералов.

С целью определения уровня и ареалов загрязнения участка расположения ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» в 2010 году по заказу ООО «Горнорудная компания Монолит» специалистами ОАО «Кольский геологический информационно-лабораторный центр» был проведен экологический мониторинг состояния окружающих экосистем, позволивший определить направление максимальной миграции токсичных веществ. Объектами мониторинга были пробы поверхностных вод и органогенного горизонта почвы A_0 .

Анализ поверхностных вод выявил загрязнение никелем, превышающее ПДК в 3–79 раз, во всех водоемах, расположенных в непосредственной близости от отвалов. В водоемах был нарушен порядок распределения основных ионов, характерный для пресноводных экосистем Мурманской области. Особенно загрязненным оказалось болото, примыкающее к отвалам с южной стороны (рис. 6): концентрация Ni в нем превысила ПДК в 4736 раз, Co и Mn в 5,5 раз, Cu в 1,2 раза, SO_4^{2-} в 1,8 раз. Вода в болоте имела кислую реакцию: $pH = 3,65$ (Селезнев и др., 2013; Маслобоев и др., 2014).

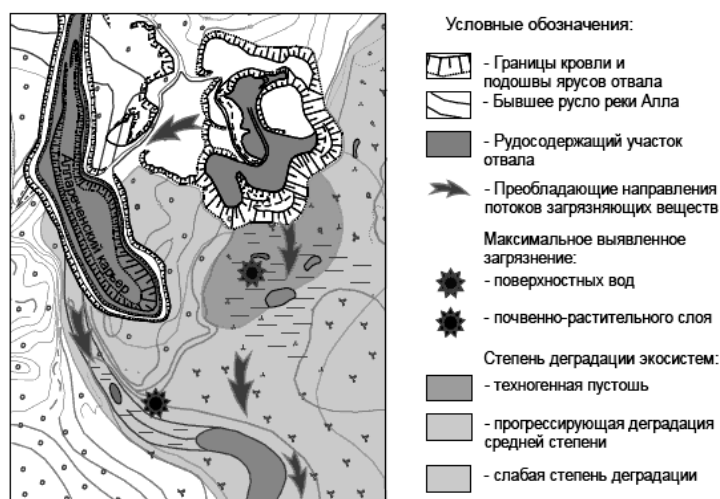


Рис. 6. Ситуационный план ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» (по: Маслобоев и др., 2014)

Загрязненными оказались и почвы. В органогенном горизонте болота с южной стороны отвала концентрации тяжелых металлов превысили условно-фоновые показатели по никелю в 877 раз, меди — в 227, кобальту — в 61 раз. Наибольшее загрязнение отмечено на левом берегу бывшего русла реки Аллы, т.е. на достаточном удалении от отвала (см. рис. 6). Превышение концентраций поллютантов в этом месте в сравнении с условно-фоновыми показателями составили: Ni в 1172, Co в 233, Cu в 123 раза. На прилегающих к отвалу территориях наблюдается прогрессирующая деградация экосистем. Некоторые участки превратились в техногенную пустошь (рис. 1в). Площадь деградированных территорий значительно превышает площадь подошвы самого отвала.

В феврале 2013 года сотрудниками лаборатории и ООО «Горнорудная компания Монолит» был проведен отбор проб воды затопленного карьера (рис. 1б) для определения концентраций тяжелых металлов, водородного показателя и

окислительно-восстановительного потенциала, а также градиента этих показателей по глубине отбора проб. Вода затопленного карьера оказалась менее загрязненной, чем предполагалось: содержание Ni превышало ПДК в 35–40 раз. Несмотря на то, что нижние горизонты затопленного карьера не являются проточными, концентрации тяжелых металлов не увеличивались с глубиной. Возможно, вследствие восстановительной обстановки в водоеме происходит образование вторичных сульфидных минералов и их осаждение на дне; в этой связи представляет интерес отбор и анализ вещественного состава донных отложений. Судя по результатам анализов содержания Ni в поверхностном слое (~0,8 мг/л), воды карьера аккумулируют в себе до 5,5 т растворенного никеля.

Исследование разновозрастных отвальных шлаков медно-никелевого производства АО «Кольская ГМК»

Отвалы шлаков плавильного цеха комбината «Печенганикель», образованные в 1945 году, также могут рассматриваться как техногенное месторождение, содержащее более 45 млн т сырья. Шлаки медно-никелевого производства представляют серьезную опасность для окружающей среды (Зосин и др., 2003; Паршина, 2009), тем более, находясь под воздействием атмосферных осадков и поступающих на шлакоотвал шахтных вод. С целью оценки экологической опасности и свойств шлаков как потенциального сырья были изучены шлаки текущего производства, отобранные в 2011 году (рис. 7), и лежалые шлаки, складированные в отвале более 15 лет (Потапов и др., 2012а,б).

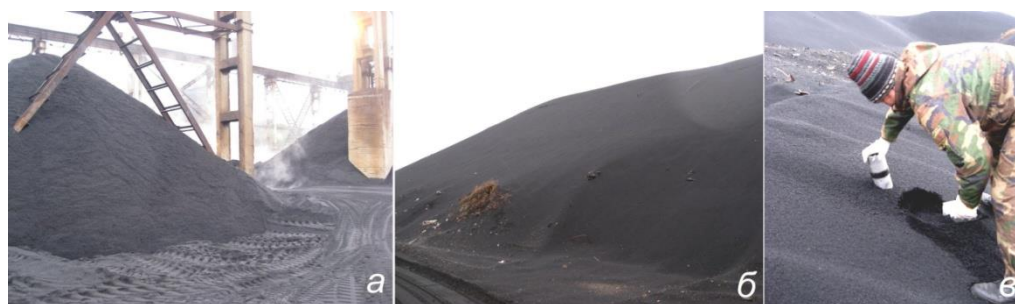


Рис. 7. Гранулированные шлаки медно-никелевого комбината «Печенганикель»: а — шлаки текущего производства; б — отвал лежалых шлаков; в — отбор образцов шлаков с ненарушенной структурой

Лежалые шлаки отличаются от шлаков текущего производства увеличением содержания фракции $-0,1$ мм. Для всех классов крупности лежалых шлаков характерна значительная неоднородность по гранулометрическому составу, очевидно связанная с дифференциацией вещества, как на стадии складирования, так и в процессе хранения, и с возможными гипергенными процессами. При исследовании инженерно-геологических свойств лежалых шлаков (табл. 1) выявлены высокие обратные корреляционные связи между плотностью шлака в естественном состоянии и пористостью, плотностью шлака в сухом состоянии и пористостью, плотностью шлака в естественном состоянии и влажностью, плотностью шлака в сухом состоянии и влажностью. Влажность лежалых шлаков зависит от пористости (высокая прямая корреляция).

Таблица 1

Свойства лежалых шлаков

Показатели	Плотность, г/см ³		Влажность, %	Пористость, %	Фракция –0,1 мм, %
	истинная	в естественном состоянии			
Среднее значение	3,32	1,73	3,36	49,77	0,63
Стандартное отклонение	0,04	0,14	0,79	4,53	0,40
Дисперсия	0,002	0,02	0,63	20,56	0,16

Химический состав текущих и лежалых шлаков представлен в таблице 2. Различия в содержании оксида магния и оксидов железа, очевидно, связаны с изменением состава концентратов, поступающих на пирометаллургический передел, и с особенностями процесса плавки.

Таблица 2

Химический состав шлаков медно-никелевого комбината «Печенганикель»

Шлак	Содержание, %									
	TiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MnO	SiO ₂
I	0,71	0,53	12,00	23,51	2,09	13,31	1,04	6,03	0,11	40,61
II	0,80	0,72	10,03	26,55	3,16	10,39	1,12	6,81	0,13	40,53

Примечание. I — шлаки текущего производства, II — лежалые шлаки.

Проведено сравнение распределения содержания цветных металлов и железа по фракциям в текущих и лежалых шлаках. В шлаках текущего производства высокое содержание цветных металлов обусловлено плавкой более богатых концентратов, а также гипергенными процессами в отвале. Содержание никеля в текущих шлаках существенно выше в классах –0,1 и +5 мм (рис. 8), однако с учетом их низкого выхода (0,09 и 0,63 % соответственно) этот факт вряд ли представляет технологический интерес. В лежалых шлаках содержание никеля также выше в мелких классах, а выход фракций –0,25 мм составляет около 3 %. Медь и кобальт более равномерно распределены в шлаках текущей переработки. Для лежалых шлаков характерно повышенное содержание меди в классе –0,5 мм и кобальта –0,1 мм. В случае утилизации лежалых шлаков, например, в производстве строительных материалов, возможно выделение фракции –0,25 мм для доизвлечения цветных металлов.

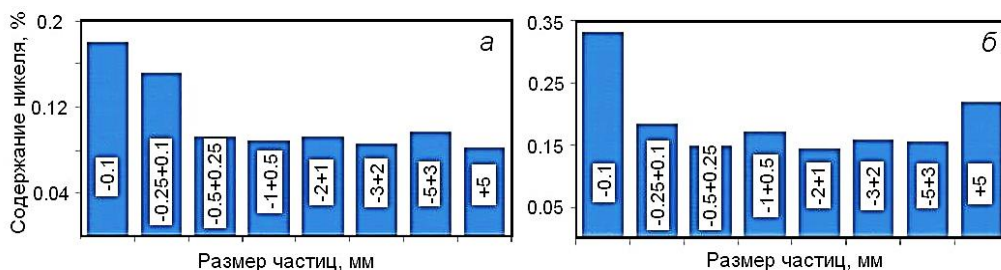


Рис. 8. Распределение содержания никеля по классам крупности в лежалых шлаках (а) и шлаках текущего производства (б)

Включения сульфидов в гранулированном шлаке текущего производства распределены неравномерно и не во всех зернах основной массы (матрицы шлака), состоящей из оливина и стекла (рис. 9а). Сульфиды чаще округлой формы (шарики, капли), реже – овальной; встречаются сростки отдельных зерен сульфидов (рис. 9б). Размеры сульфидов варьируют от 5 до 20 мкм, изредка попадаются зерна крупностью до 50 мкм (рис. 9в). Часто наблюдаются зерна основной массы (по всей видимости, стекло), в которых проявляются скелетные игольчатые кристаллы оливина, образующие структуру спинифекс (рис. 9г). В основной массе стекла, обрамляя игольчатые кристаллы оливина, расположены множественные мелкие сульфидные включения размерами 1,5–2,0 мкм (рис. 9г).

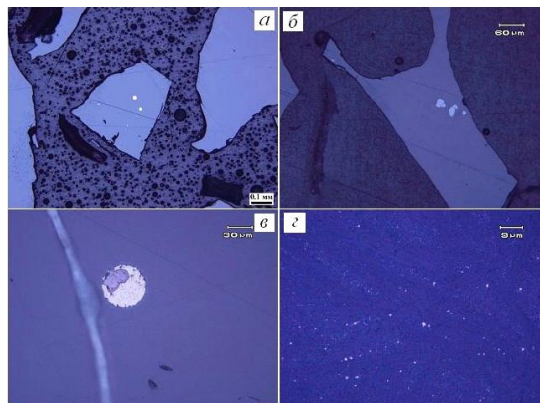


Рис. 9. Сульфидные включения в шлаках текущего производства медно-никелевого комбината «Печенганикель»: а — сульфиды округлые формы; б — сульфиды овальной формы и их срастания; в — крупное зерно сульфида; г — мелкие включения сульфидов округлой формы между игольчатыми кристаллами оливина

Сульфидные включения лежалых шлаков значительно крупнее, видны невооруженным глазом. Размер сульфидных зерен варьирует от 5–10 до 20–70 мкм. По форме это как округлые включения, подобные сульфидам текущих шлаков (рис. 10а,б), так и сложные образования кривоугонной формы (рис. 10в,г).

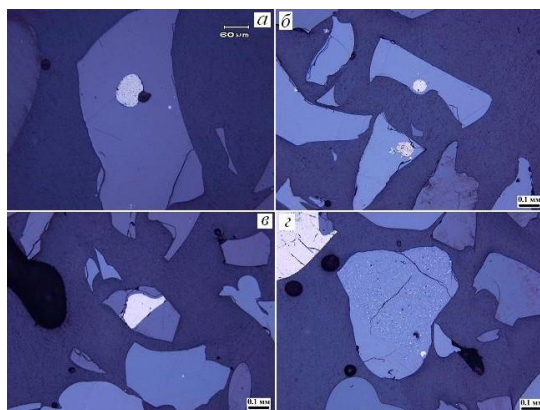


Рис. 10. Сульфидные включения в лежалых шлаках шлаки комбината «Печенганикель»: а, б — крупные округлые выделения сульфидов; в, г — кривоугонные формы сульфидов; г — включения сульфидов между иголочками оливина

В основной массе шлака, представленной стеклом, наблюдаются скелетные игольчатые кристаллы оливина. Оливин диагностирован методом РФА (табл. 3) и микрозондовым анализом. Химический состав оливина следующий (в мас. %): SiO_2 — 36,00; Al_2O_3 — 1,39; FeO — 10,23; MgO — 48,33; CaO — 0,46; Na_2O — 0,18; K_2O — 0,11; суммарно 96,70 %. В стекле отмечены включения минерала из группы шпинели, предположительно, магнезиоферрита, размером до 2,0 мкм. Химический состав минерала: Al_2O_3 — 2,69; Cr_2O_3 — 1,63; FeO — 74,27; MgO — 11,27; суммарно 89,85 %.

Таблица 3

Дифрактограмма шлака текущего производства комбината «Печенганикель» (I) и эталонного оливина (II)

I		II (JCPDS, 7-159)		
d, Å	I	D, Å	I	Hkl
3,921	50	3,916	40	021
3,527	61	3,516	30	111
2,794	100	2,791	100	130
2,529	75	2,533	60	131
2,478	78	2,473	60	112
2,281	31	2,285	30	122
1,765	29	1,761	30	222

Примечание. Условия съемки: дифрактометр ДРОН-2.0, CuK α -излучение. Оператор Т. М. Рябухина (Институт минералогии УрО РАН).

Химический состав сульфидов лежалых (ШЛ) и шлаков текущего производства (ШТ) представлен в таблице 4. Состав сульфидов удовлетворительно пересчитывается на формулу пентландита (Fe,Ni) $_9$ S $_8$.

Таблица 4

Химический состав сульфидов в шлаках комбината «Печенганикель» (мас. %)

Компонент	ШЛ-2_1	ШЛ-2_2	ШЛ-2_3	ШТ-3_2	ШТ-3_3
Fe	55,15	52,98	49,12	33,97	36,97
Cu	6,15	7,56	10,64	8,24	7,23
Ni	3,86	4,45	4,82	22,90	19,43
Co	0,26	0,27	0,27	0,97	0,80
Cr	0,19	0,16	0,09	-	0,06
S	32,91	32,85	32,08	32,30	31,70
Сумма	98,51	99,83	98,66	98,38	98,25
Кристаллохимические формулы					
ШЛ-2_1	(Fe $_{7,70}$ Cu $_{0,76}$ Ni $_{0,51}$ Co $_{0,03}$ Cr $_{0,03}$) $_9$ S $_8$				
ШЛ-2_2	(Fe $_{7,41}$ Cu $_{0,93}$ Ni $_{0,59}$ Co $_{0,04}$ Cr $_{0,02}$) $_8,99$ S $_8$				
ШЛ-2_3	(Fe $_{7,03}$ Cu $_{1,34}$ Ni $_{0,66}$ Co $_{0,04}$ Cr $_{0,02}$) $_9,09$ S $_8$				
ШТ-3_2	(Fe $_{4,83}$ Ni $_{3,09}$ Cu $_{1,03}$ Co $_{0,13}$) $_9,08$ S $_8$				
ШТ-3_3	(Fe $_{5,36}$ Ni $_{2,68}$ Cu $_{0,92}$ Co $_{0,11}$ Cr $_{0,01}$) $_9,08$ S $_8$				

Примечание. Аналитические работы выполнены в лаборатории Физики минералов и экспериментальной минералогии ИМин УрО РАН на EDS спектрометре INCA-200. Аналитик Е. И. Чурин.

С целью оценки воздействия хранящихся в отвалах гранулированных шлаков на окружающую среду, а также возможностей гидрометаллургических методов переработки данного техногенного сырья, были проведены две серии опытов.

В первой серии оценивали возможность гидрометаллургических методов переработки гранулированных шлаков методом кучного выщелачивания. Шлаки (лежалые и текущего производства) подвергали взаимодействию с 1 % раствором

серной кислоты. Опыты вели в динамическом режиме в колонках при температуре $+18 \pm 2$ °С на протяжении 26 суток. Загрузка шлаков составляла 250 граммов. Кислоту в объеме 50 мл подавали раз в 2 дня. Растворы на выходе из колонок анализировали методом ААС.

Во второй серии опытов моделировали процесс гипергенеза шлаков по аналогии с описанным выше способом исследования гипергенеза руд (Халезов, 2009) с последующей диагностикой новообразованных минеральных фаз. Шлаки (навеска 60 г) подвергали взаимодействию с дистиллированной водой, 2 % раствором серной кислоты и тем же раствором с добавлением ионов Fe^{3+} в качестве окислителя (расход 80 г/т шлака) в режиме попеременное увлажнение–высыхание при температуре $+45 \pm 2$ °С в течение 30 суток. Режим увлажнения — 4 раза в сутки по 10 мл раствора. По окончании опытов проводили выщелачивание образцов дистиллированной водой при комнатной температуре в течение 4 ч при перемешивании. Соотношение твердой и жидкой фаз составляло 1:5. Растворы выщелачивания анализировали методом ААС, твердую фазу исследовали методами РФА и микроскопического анализа.

В ходе опытов в динамическом режиме наблюдалось некоторое снижение фильтрационных характеристик материала, связанное с растворением силикатной матрицы гранул с образованием кремнегеля. Более интенсивно этот процесс шел в шлаках текущего производства. На дифрактограммах образцов новообразований отчетливо фиксировалось гало в области углов $2\Theta = 20\text{--}40$ °, которое отвечало аморфному кремнезему. Также фиксировались слабые рефлексы недиагностированной сульфатной фазы, возможно, изоструктурной ярозиту.

В результате выщелачивания шлаков произошли изменения в их гранулометрическом составе. Как для лежалых, так и для текущих шлаков наблюдалось значительное снижение содержания класса крупности $-0,5$ мм. В более крупных классах также произошло перераспределение соотношений их содержаний. Это могло быть связано как с растворением гранул, так и с образованием геля кремниевой кислоты, переходящего при высыхании в аморфный кремнезем. Величины водородного показателя и окислительно-восстановительного потенциала растворов выщелачивания варьировали незначительно и составляли $3,6 \pm 0,2$ и 200 ± 20 мВ соответственно.

Никель более интенсивно выщелачивался из шлаков текущего производства (рис. 11). Извлечение меди также было выше в текущих шлаках. Извлечения кобальта были примерно одинаковы в обоих экспериментах. Концентрации цветных металлов в растворах выщелачивания лежалых шлаков на протяжении опыта составили, $\text{min} - \text{max}$, мг/л: Ni 5,4 — 29,0; Cu 8,1 — 15,9; Co 5,8 — 6,1; Fe 2,5 — 3,3. Для шлаков текущего производства они были существенно выше: Ni 15,2 — 47,9; Cu 7,4 — 29,1; Co 7,6 — 11,1; Fe 2,1 — 3,0 мг/л. Таким образом, опыты показали достаточно интенсивное выщелачивание цветных металлов и железа из шлаков как текущего производства, так и лежалых (Макаров и др., 2013).

Дифрактограммы новообразованной корки и шлаков в объеме образца после завершения опытов с раствором серной кислоты, как в присутствии окислителя, так и без него, практически идентичны. На рисунке 12 представлена дифрактограмма новообразований лежалого шлака, рефлексы на которой отвечают старкииту $\text{MgSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$, и, вероятно, минералам из этой же группы — розениту $\text{FeSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ и эплюиту $(\text{Co}, \text{Ni})\text{SO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$.

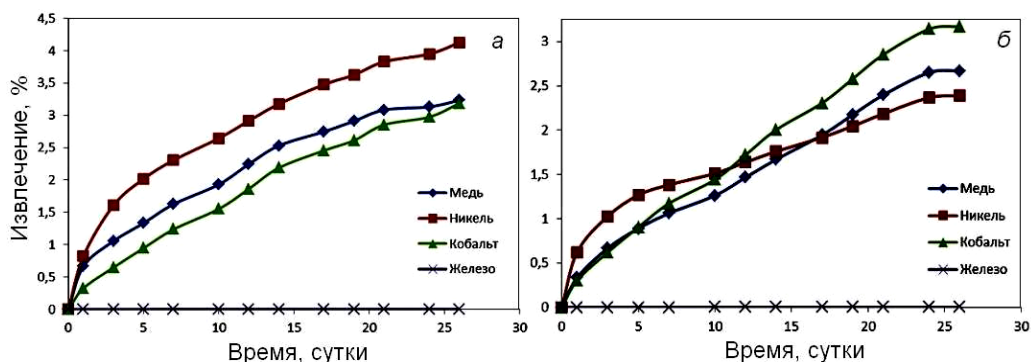


Рис. 11. Кинетика выщелачивания цветных металлов из шлаков комбината «Печенганикель». Шлаки: а — текущего производства; б — лежалые

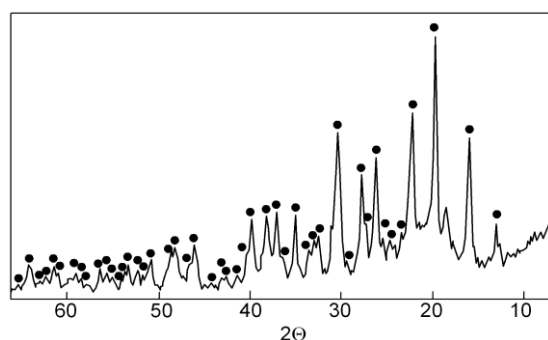


Рис. 12. Дифрактограмма новообразований лежалого шлака после обработки в режиме увлажнение–высыхание раствором серной кислоты. Черные точки — рефлекссы старкиита и изоструктурных сульфатных фаз

ИК спектры диффузионного отражения обработанных в режиме увлажнение — высыхание раствором серной кислоты с окислителем и без него лежалых шлаков и шлаков текущего производства свидетельствуют об образовании сульфатов: это полосы при 1120 и 1090 cm^{-1} ($\nu_2\text{SO}_4$), 985 cm^{-1} ($\nu_1\text{SO}_4$), 618 cm^{-1} ($\nu_4\text{SO}_4$) (рис. 13а,б). Полосы при 3559 , 3474 , 3390 , 3270 cm^{-1} ($\nu\text{H}_2\text{O}$) и 1659 , 1628 cm^{-1} ($\delta\text{H}_2\text{O}$) соответствуют валентным и деформационным колебаниям кристаллогидратной воды сульфатов. При обработке дистиллированной водой процессы гипергенеза выражены значительно слабее (рис. 13в).

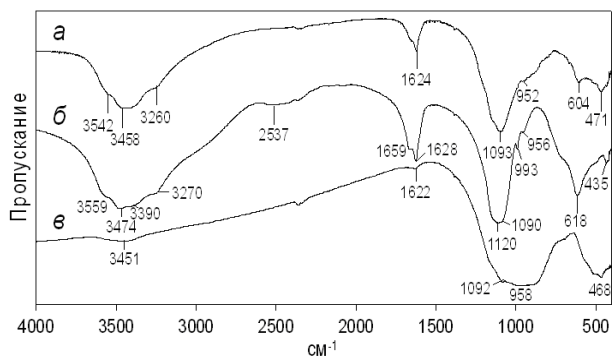


Рис. 13. ИК спектры диффузионного отражения лежалого шлака в объеме образца (а) и новообразованной корки (б) после обработки в режиме увлажнение–высыхание раствором серной кислоты и дистиллированной водой (в)

Анализ растворов выщелачивания позволил рассчитать переход цветных металлов в растворимые формы. Извлечения металлов (Ni, Cu, Co) в раствор из лежалого шлака составили соответственно, %:

- в опыте с дистиллированной водой 0,38; 0,01; 0,05;
- с серной кислотой 16,14; 5,16; 21,90;
- с серной кислотой и окислителем 11,00; 3,32; 14,34.

Для шлаков текущего производства извлечения этих металлов были следующими, %:

- опыт с дистиллированной водой Ni 0,11, Cu 0,10, Co 0,04;
- с серной кислотой 15,50; 6,01; 22,51;
- с серной кислотой и окислителем 18,79; 4,94; 27,71.

Результаты опытов, моделирующие гипергенез шлаков в ускоренных условиях, показывают резкое, на два и более порядка увеличение скорости перехода цветных металлов в растворимые формы при обработке кислыми растворами.

Разработка методов извлечения цветных металлов из хвостов обогащения и некондиционных медно-никелевых руд

Для действующих горных предприятий переработка сырья ТО является наиболее эффективным способом укрепления минерально-сырьевой базы и повышения эффективности ее эксплуатации, снижения ресурсоемкости продукции и оздоровления окружающей среды (Чантурия, Вигдергауз, 2008а). За рубежом хвосты обогащения вовлекаются в эксплуатацию в связи с истощением запасов качественных руд. Установки по доизвлечению меди из хвостов текущей переработки работают на фабриках в США, Филиппинах, Заире, Австралии (Чайников, Крючкова, 1994). В то же время многочисленными исследованиями показано, что вследствие особенностей форм нахождения полезных минералов, высокой степени дисперсности, изменений физических и физико-химических свойств поверхности минералов, техногенное сырье не может быть эффективно переработано традиционными методами; экономически эффективна переработка лишь небольшого набора техногенного сырья (Чантурия, Корюкин, 1998).

Научные и технологические исследования по вовлечению в переработку сырья ТО связаны с созданием новых нетрадиционных технологий с использованием комбинации обогатительно-гидрометаллургических приемов (Чантурия, 2007). Анализ методов доизвлечения металлов из отвальных хвостов (лежалых и текущих) обогатительных фабрик Российской Федерации и других стран содержится в обзоре Б. П. Руднева (2009а). Для переработки отвальных хвостов обогатительных фабрик в настоящее время наиболее широко применяют репульпацию лежалых хвостов с последующей перефлотацией; классификацию текущих и репульпацию лежалых хвостов, выщелачивание меди, флотацию шламов; классификацию с доизмельчением песковой фракции и последующей флотацией; гравитационные методы обогащения; магнитную сепарацию; выщелачивание золота цианидами с сорбцией на угле (процесс «уголь в пульпе»). Таким образом, для переработки хвостов эффективными могут оказаться флотационные, комбинированные флотационно-гидрометаллургические и гидрометаллургические методы.

Б. П. Рудневым (2009б) дано физическое обоснование возможности разделения минеральных частиц по плотности и крупности на стадии складирования при гидротранспорте отвальных хвостов. Показано, что продукт, выделенный из придонной части напорного хвостопровода Алмалыкской медной обогатительной фабрики, содержал в 3 раза больше меди и золота, чем общие хвосты. Подобные методы предконцентрации ценных компонентов из отвальных хвостов могут быть использованы для последующей переработки техногенных продуктов. Перспективные инновационные технологии переработки предложены для лежалых хвостов обогащения медно-цинковых руд (Чантурия и др., 2004а; Макаров, 2006).

В ряде случаев для переработки техногенного сырья перспективны физико-химические геотехнологии. К их числу относится кучное выщелачивание цветных металлов, технология которого состоит в следующем (Халезов, 2013; Watling, 2006). На поверхность или внутрь кучи подается раствор, содержащий серную кислоту, окислитель (кислород, ионы железа (III) и др.) и микроорганизмы (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Th. thiooxidans* и др.). Раствор равномерно распределяется по поверхности и массе отвала посредством бассейнов, дренажных канав, сети перфорированных труб или разбрызгиванием. Выходящий из-под кучи раствор, обогащенный цветными металлами, собирается по канавам или трубам и направляется на дальнейшую переработку.

Зарубежная гидрометаллургическая практика свидетельствует о перспективности применения кучного выщелачивания золота, меди и урана из бедных руд и отходов горного и обогатительного производств (Халезов, 2013; Watling, 2006). Около 20% годового мирового производства меди приходится на кучное выщелачивание руд и выщелачивание отвалов горнодобывающих производств. В последнее десятилетие начаты опытно-промышленные работы по кучному выщелачиванию бедных медно-никелевых сульфидных руд на объектах: Радио Хилл, Западная Австралия; Талвиваара, Соткамо, Финляндия; Хами, Синьцзян, КНР и ряд других (Watling, 2008; Watling et al., 2009; Halinen et al., 2009; Maley et al., 2009a,b; Qin et al., 2009; Zhen et al., 2009; Yang et al., 2011; Bhatti et al., 2012).

При использовании кучного выщелачивания содержание полезных компонентов может быть существенно ниже, чем при традиционных металлургических технологиях. В технологии кучного выщелачивания, применяемой финской компанией «Talvivaara Mining Company Plc» на никелевом руднике месторождения полиметаллических руд в субарктической зоне на северо-востоке Финляндии, среднее содержание в руде составляет, %: Ni — 0,23; Cu — 0,13; Co — 0,02; Zn — 0,51 (Кашуба, Лесков, 2014). В случаях переработки техногенного сырья кондиционное содержание может быть еще ниже за счет того, что затраты на добычу в основном уже понесены, а затраты на транспортировку производятся в рамках статьи на рекультивацию (Лодейщиков, 2009).

В Российской Федерации промышленное внедрение извлечения цветных металлов из природных и техногенных сульфидных месторождений пока не получило широкого распространения. Определенным препятствием является суровость климатических условий большинства рудных районов страны. Зарубежные предприятия расположены преимущественно в странах с теплым климатом, что позволяет круглый год использовать на них гидрометаллургические процессы, включая бактериальные технологии (Халезов, 2013). Следует учитывать, что окисление сульфидов – экзотермический процесс,

поэтому даже при их невысоком содержании в руде (включая сульфиды железа) может наблюдаться локальный разогрев вещества отвала, благоприятствующий интенсификации бактериального выщелачивания. Для повышения интенсивности вскрытия сульфидных минералов разрабатываются новые, экологически безопасные и энергосберегающие методы на основе физических, физико-химических и механохимических воздействий (Чантурия и др., 2011; Чантурия, Козлов, 2014; Chanturiya et al., 2007). Отметим также, что в последние годы российскими учеными разработаны геохимические основы геотехнологии цветных металлов при отрицательных температурах и в условиях многолетней мерзлоты (Птицын, 1992; Птицын и др., 2002; Юргенсон, 2009). Результаты этих работ могут быть адаптированы применительно к объектам Мурманской области, и коллектив лаборатории занимается исследованиями в этом направлении.

Интенсификация кучного выщелачивания цветных металлов из некондиционных медно-никелевых руд, отвалов вскрышных пород и хвостов обогащения

Хвосты обогащения медно-никелевых руд АО «Кольская ГМК». Хвостохранилище обогатительной фабрики № 1 медно-никелевого комбината «Печенганикель» Кольской ГМК в населенном пункте Заполярный Мурманской области эксплуатируется с 1965 года (рис. 14). Объем хвостов обогащения медно-никелевых руд составляет более 250 млн. тонн. Гранулометрический и минеральный состав хвостов может варьировать в зависимости от особенностей руды и технологического процесса. Для хвостов характерно преобладание фракции с размером зерен $-0,1$ мм, во многих случаях до 50% зерен имеет крупность $-0,044$ мм. Около 60 % объема хвостов составляют серпентины (Макаров и др., 2004, 2005а); в заметных количествах присутствуют пироксены, амфиболы, тальк, хлориты, кварц, полевые шпаты. Основными рудными минералами являются магнетит, пирротин, пентландит, халькопирит. Общее содержание сульфидных минералов оценивается в 1–3 %.



Рис. 14. Хвостохранилище обогатительной фабрики № 1 медно-никелевого комбината «Печенганикель»: а — зона пляжа; б — намыв хвостов

При переработке тонкодисперсных техногенных продуктов или природного сырья с высоким содержанием слоистых гидросиликатов (глинистых минералов) возникают проблемы коагуляции, приводящие к ухудшению проницаемости штабеля выщелачивающими растворами и к остановке процесса. Данные явления мы

наблюдали при хранении хвостов обогащения медно-никелевых руд (Макаров и др., 2004). Появление в лежалых хвостах хлоритов, а также смешанно-слоистых образований с чередованием хлоритовых и смектитовых слоев приводит к образованию глиноподобных искусственных грунтов и снижению коэффициента фильтрации более чем в 100 раз (Макаров и др., 2005а).

Одним из путей решения этой проблемы является грануляция хвостов с использованием вяжущих материалов. Наиболее часто в качестве вяжущих компонентов применяют известь и портландцемент. В опытно-промышленных испытаниях сернокислотного кучного выщелачивания хвостов обогащения медно-цинковых руд Бурибаевской обогатительной фабрики для приготовления окатышей использовали негашеную известь в количестве 5 % (Рыльникова и др., 2008). Нами в лабораторных условиях проведено перколяционное сернокислотное выщелачивание хвостов обогащения медно-никелевых руд (Masloboev et al., 2012). При приготовлении гранул в качестве вяжущего использовали портландцемент в количестве 3–5 %. Однако, вследствие развития сульфоалюминатной коррозии цементного камня, гранулы при выщелачивании теряли прочность и частично разрушались. Это ограничивает возможности длительного (100 и более суток) промышленного применения процесса выщелачивания. Однако с учетом избытка серной кислоты, производимой предприятиями АО «Кольская ГМК», перспективным представляется процесс гранульной сульфатизации, в котором серная кислота используется в качестве связующего.

Проведены эксперименты с получением окатышей при соотношении твердой и жидкой фаз Т:Ж = 5–3:1. В качестве связующего применяли раствор H_2SO_4 концентрацией 10–30%. Испытания проводили с гранулами диаметром 0,8–1 см и максимальной прочностью при сжатии 2,8–3 МПа. В дальнейшем в качестве связующего использовали 10 %-ю кислоту с соотношением фаз Т:Ж = 3:1. Перколяционное выщелачивание вели 1–3%-й серной кислотой в колонках диаметром 45 мм в течение 110 суток. Загрузка окатышей составляла 150 г. Окатыши предварительно насыщались водой. Пауза между орошениями составляла 2–3 суток, объем подаваемой кислоты — 25 мл. Хвосты содержали, %: Ni — 0,17; Cu — 0,07; Co — 0,01. Растворы на выходе из колонок анализировали методом ААС, твердую фазу — методом РФА.

На рисунке 15 представлены дифрактограммы хвостов обогащения медно-никелевых руд и окатышей из верхнего и нижнего слоев колонки, отобранных по окончании выщелачивания 1 %-й серной кислотой. Как видно, в составе хвостов преобладали серпентины (рис. 15а). Количественная оценка содержания минеральных фаз, проведенная по соотношению интенсивностей главных рефлексов, свидетельствовала о наличии магнетита (17 %), кварца (16 %), полевых шпатов (10 %) и, в незначительных количествах, пироксенов и амфиболов (~3 %). Диагностированы сульфиды цветных металлов — пентландит и халькопирит (стрелка на рис. 15а). Дифрактограммы окатышей после выщелачивания отличались исчезновением рефлексов сульфидов и увеличением содержания хлоритов, особенно в нижних слоях колонки (рис. 15б,в). Появлялись недиагностированные фазы.

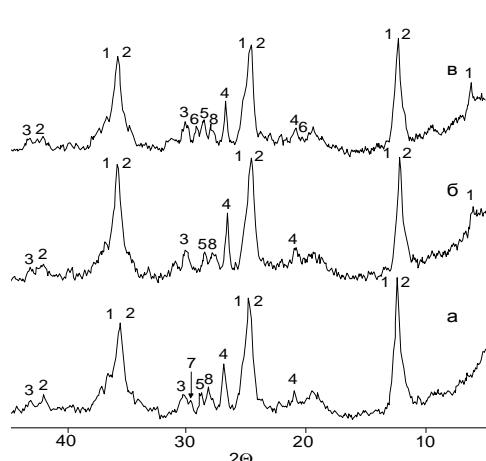


Рис. 15. Фрагменты дифрактограмм хвостов обогащения медно-никелевых руд (а) и окатышей после выщелачивания из верхнего (б) и нижнего (в) слоя колонки. Основные рефлексы минералов: 1 — хлорит; 2 — серпентин; 3 — магнетит; 4 — кварц; 5 — тальк; 6 — гипс; 7 — сульфиды (пентландит, халькопирит), 8 — полевоы шпат

На поверхности окатышей из верхнего слоя колонки образовался налет, представляющий смесь сульфатных фаз: белого полупрозрачного гексагидрита $MgSO_4 \cdot 6H_2O$, бесцветного эпсомита $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, в котором магний частично может быть изоморфно замещен железом, никелем и кобальтом, а также гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, образующего округлые агрегаты игольчатых кристаллов. Образование этих фаз свидетельствовало о взаимодействии с сернокислым раствором не только сульфидных минералов, но и силикатов, прежде всего, серпентина. В то же время, химически инертные кварц, полевоы шпат и магнетит за время экспериментов практически не растворялись, и их относительное содержание в окатышах в нижнем слое не изменилось.

Процесс выщелачивания металлов в эксперименте протекал достаточно интенсивно (рис. 16). Концентрации никеля в растворе были стабильны и находились в диапазоне 0,1-0,35 г/л. Эти показатели приемлемы для промышленной реализации метода при условии оборота растворов. С учетом растворения части силикатных минералов, концентрации железа достигали 0,9 г/л. Таким образом, необходима проработка технических решений селективного удаления железа из продуктивных растворов. Следует отметить высокие концентрации меди. Показатели для кобальта также были достаточно стабильны.

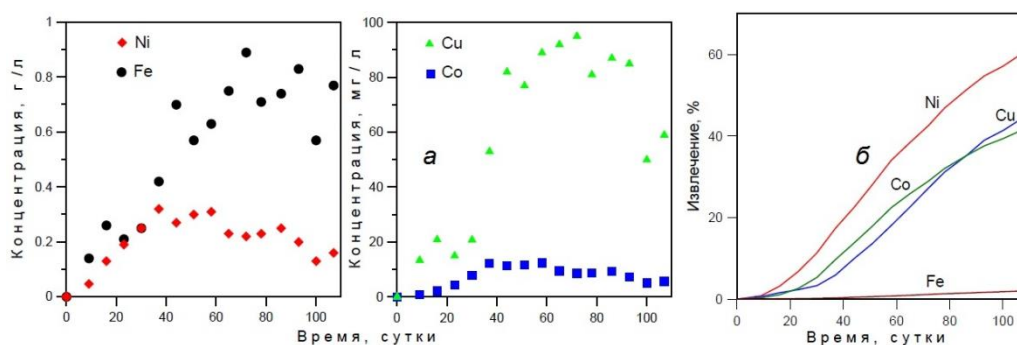


Рис. 16. Концентрации металлов в растворах выщелачивания хвостов обогащения медно-никелевых руд (а) и кинетика этого процесса (б)

График кинетики выщелачивания металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд отражает наиболее интенсивное выщелачивается никеля (рис. 16б). За 110 суток в раствор перешло около 60 % содержащегося в гранулах металла. Более низкие показатели для меди (~44 %) объясняются присутствием этого металла в составе халькопирита (Халезов, 2013), а пониженные показатели для кобальта (~41 %) связаны, вероятно, с нахождением части металла в виде изоморфной примеси в магнетите.

На следующем этапе исследовали влияние концентрации серной кислоты (1, 2 и 3 % растворы) на кинетику извлечения цветных металлов в режиме перколяционного выщелачивания. Исследования проводили в течение 45 суток. Наилучшее извлечение металлов было достигнуто с использованием 3 % серной кислоты. В качестве примера показана кинетика извлечения никеля (рис. 17).

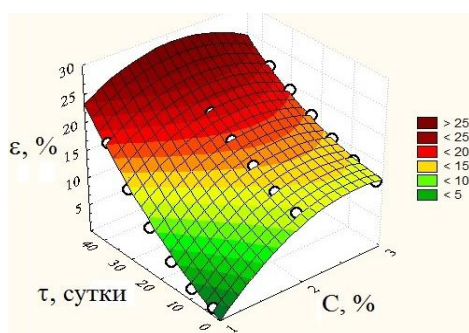


Рис. 17. Влияние концентрации выщелачивающего реагента (С) и времени выщелачивания (τ) на извлечение никеля (ε) из хвостов обогащения

Средние интенсивности выщелачивания металлов в сутки составили, %: Ni — 0,55; Cu — 0,40; Co — 0,37. Таким образом, полученные результаты показывают возможность промышленной реализации метода кучного выщелачивания при условии оборота растворов и интенсификации выщелачивания с использованием бактерий и окислителей (Светлов и др., 2015а,б; Svetlov et al., 2015).

Бедные руды медно-никелевых месторождений Мончеплутона. Следующим объектом исследований были бедные руды медно-никелевых месторождений Мончеплутона в Мончегорском районе Мурманской области, а также отходы обогащения медно-никелевых руд АО «Кольская ГМК». Мончеплутон стал классическим примером расслоенных интрузий базит-ультрабазитового состава с разнообразными типами оруденения (Припачкин и др., 2013). Выполнены минералого-технологические исследования забалансовых медно-никелевых руд Мончеплутона на примере месторождений «Морошковое озеро», «Нюд-П», «Нюд Терасса», «Ниттис-Кумужья-Гравяная» (НКТ) на предмет их возможной переработки гидрометаллургическими методами. Минеральный состав исследованных руд преимущественно пирротиновый с примесями пентландита, халькопирита, магнетита и др. (Светлов, Макаров, 2016).

По данным минералогического анализа руды месторождения «Нюд-П», пирротин образует сульфидную матрицу руды и содержит вросстки пентландита (рис. 18а,б). Магнетит образует гипидиоморфные зерна в пирротине. Халькопирит широко представлен в качестве включений в пирротине, сульфиды — мелкой и пылевидной вкрапленностью в силикатах (рис. 18в). Силикаты представлены ортопироксеном и плагиоклазом. Вещество в ортопироксенах частично замещено амфиболом или хлоритом.

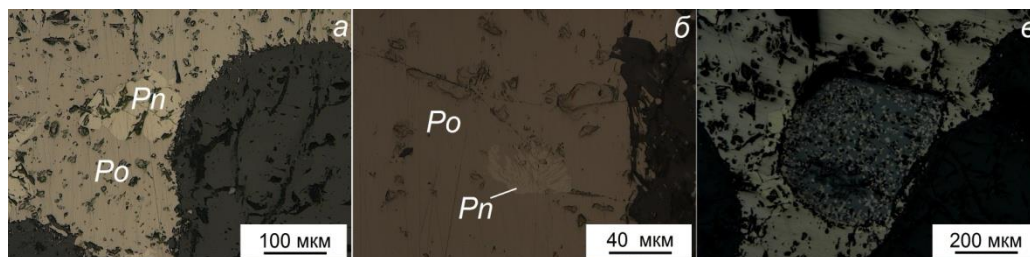


Рис. 18. Сульфиды руды месторождения «Нюд-II»:
 Po — пирротин; Pn — пентландит; а — сростки пентландита и пирротина;
 б — пламенивидный вросток пентландита в пирротине;
 в — пылевидная вкрапленность сульфидов в оливине

Минералогические исследования образца руды месторождения «Морошковое озеро», использованной для выщелачивания, показали, что магнетит образует гипидиоморфные зерна серого цвета с коричневым оттенком и составляет большую часть породы. Халькопирит — минерал ярко-жёлтой окраски, образует зерна неправильной формы в интерстициях магнетита (рис. 19а). В крупных зернах халькопирита часто наблюдаются включения пирротина (рис. 19б). Халькопирит образует сростания с пентландитом (рис. 19в).

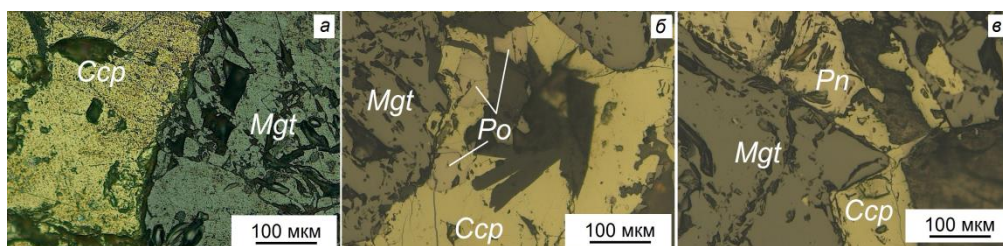


Рис. 19. Типы сростков минералов в руде месторождения «Морошковое озеро».
 Ccp — халькопирит; Mgt — магнетит; а — включения халькопирита в магнетите;
 б — вростки пирротина в халькопирите;
 в — сложный сросток магнетита, халькопирита и пентландита

Исследовано взаимодействие руд фракции –3+2 мм с выщелачивающим реагентом (2 % серная кислота) в динамическом режиме в колонках диаметром 40 мм при температуре $+18 \pm 2$ °С в течение 60 суток. Загрузка руды составляла 150 г, перед выщелачиванием проводили ее предварительное влагонасыщение. Опыты вели без оборота растворов. Кислоту в количестве 10 мл подавали раз в 3–4 суток. Растворы на выходе из колонок анализировали методом ААС, твердую фазу — методами РФА.

Руда месторождения «Морошковое озеро» содержала, %: Ni — 0,72; Cu — 3,09; Co — 0,039. Кинетика выщелачивания этих металлов из образцов руды показана на рисунке 20. Никель и кобальт выщелачивались с одинаковой интенсивностью, медь — медленнее. Очевидно, это связано с электрохимией сульфидных минералов (Чантурия, Вигдергауз, 2008б). Халькопирит, находящийся в сростках с пирротинном и пентландитом, выступал в роли катодных

участков, на которых происходило восстановление окислителей. Ожидать приемлемого извлечения меди можно после окисления сульфидов железа и никеля (Светлов, Макаров, 2016).

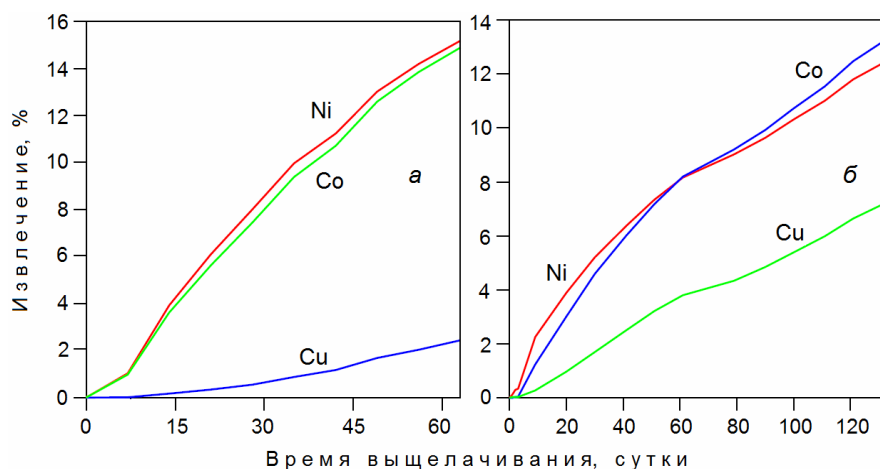


Рис. 20. Кинетика выщелачивания цветных металлов из руд месторождений «Морошковое озеро» (а) и «Нюд-П» (б)

Для руд месторождения медно-никелевых руд «Нюд-П», по данным РФА, по окончании 130 суточных опытов в динамическом режиме рудное вещество из колонок качественно не отличалось от исходного вещества (рис. 21). Отмечено снижение интенсивности рефлексов пирротина в результате его выщелачивания относительно рефлексов силикатов, особенно в верхнем слое колонки (рис. 21в).

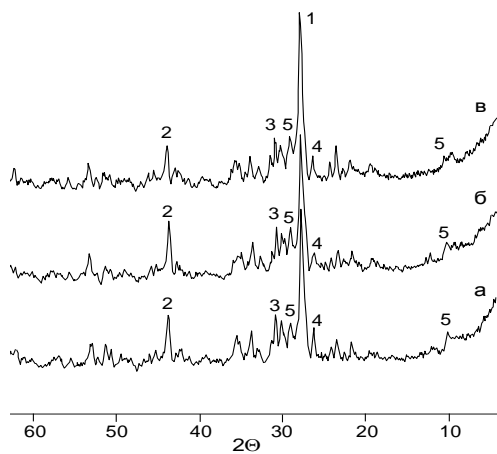


Рис. 21. Дифрактограммы руд месторождения медно-никелевых руд «Нюд-П».

Руды: а — исходная; б — после выщелачивания 2 %-м раствором H_2SO_4 , нижний слой колонки; в — верхний слой колонки.

Цифрами обозначены основные рефлексы минералов: 1 — полевопшпат; 2 — пирротин; 3 — ортопироксен; 4 — кварц; 5 — амфибол

Был проанализирован тонкий слой зеленого налета, образовавшийся на поверхности колонок. Установлено, что основная фаза налета — это новообразованный сульфат, принадлежащий к структурной группе галотрихита $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$ (пиккерингит $MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$, вупаткиит $(Co, Mg, Ni)Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$) (рис. 22). Образование сульфатов подтверждено результаты ИК спектроскопии (рис. 23).

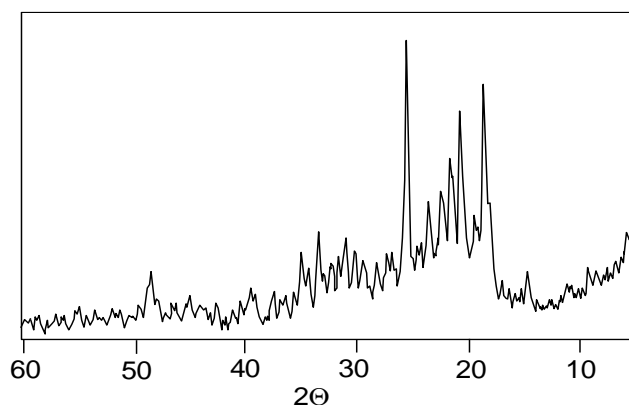


Рис. 22. Дифрактограмма новообразованной фазы — сульфатного минерала группы галотрихита на поверхности руды месторождения «Нюд-П» после сернокислотного выщелачивания

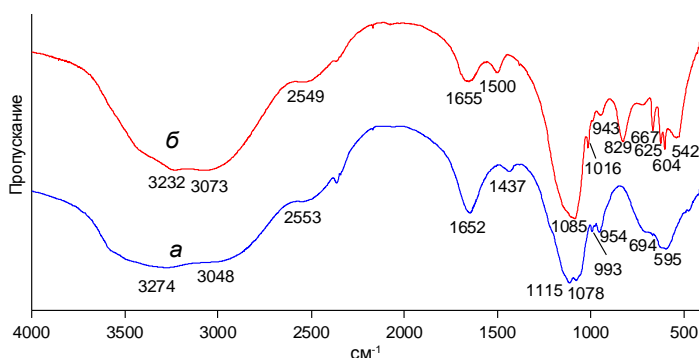


Рис. 23. ИК спектры новообразований на поверхности руды месторождения «Нюд-П» после циклов выщелачивания в колонках (а) и увлажнения–высыхания на водяной бане (б)

Кинетика выщелачивания металлов из образцов руды месторождения «Нюд-П» показана на рисунке 20б. В отличие от месторождения «Морошковое озеро» здесь наиболее интенсивно выщелачивался кобальт. Вероятно, это связано с присутствием кобальта в руде только в составе сульфидов, причем часть его содержится в пирротине. Наиболее низкие показатели выщелачивания также были характерны для меди. За 130 суток выщелачивания раствором без окислителя извлечения металлов составили, %: Co – 13,2, Ni – 12,4, Cu – 7,2.

С целью интенсификации процесса сернокислотного выщелачивания цветных металлов из некондиционных медно-никелевых руд были проведены эксперименты по их измельчению с последующей сернокислотной агломерацией. Использовали образцы бедных медно-никелевых руд трех месторождений: «Морошковое озеро», «Нюд Терраса» и НКТ. Содержания металлов в руде этих месторождений приведены в таблице 5.

Таблица 5

Содержания никеля и меди в забалансовых рудах месторождений Мончеплутона

Месторождение	Ni, %	Cu, %
НКТ	0,567	0,363
«Морошковое озеро»	0,547	0,036
«Нюд Терраса»	0,465	0,044

Руды измельчали до классов крупности: -1 , $-0,5$, $-0,25$, $-0,1$, $-0,05$ мм. Агломерацию вели с раствором H_2SO_4 концентрацией 10 % при соотношении фаз Т:Ж = 3:1. Полученные окатыши загружали в колонки диаметром 40 мм, масса загрузки составляла 150 г. В течение суток осуществляли выщелачивание дистиллированной водой, которую подавали в количестве 300 мл в два этапа по 150 мл. Через 3 суток начинали выщелачивание 2 %-м раствором кислоты, которую подавали в количестве 25 мл раз в трое суток. Общая продолжительность опытов составляла 32 дня. Растворы на выходе из колонок анализировали на содержание Ni и Cu методами вольтамперометрии («Экотест ВА») и спектрофотометрии («СФ-2000»). Твердую фазу исследовали методами РФА. Окатыши, полученные из руды, крупностью -1 , $-0,5$ и $-0,25$ мм при водном выщелачивании значительно теряли прочность и частично разрушались; окатыши из фракций $-0,1$ и $-0,05$ мм показали устойчивость в процессе водного и последующего кислотного выщелачивания.

Концентрации Ni и Cu в продуктивных растворах выщелачивания руды оказались достаточно высокими, за исключением второго этапа водного выщелачивания (рис. 24). Концентрация Ni после достижения максимума несколько снижалась, находясь, в то же время, в области приемлемых для промышленной практики значений.

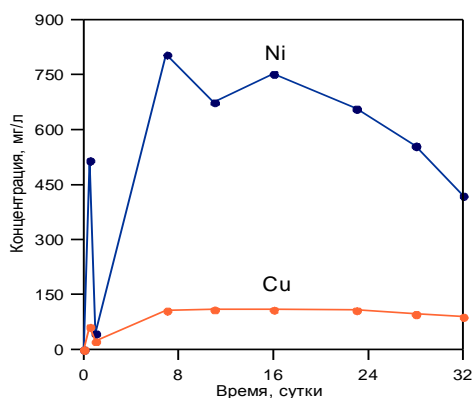


Рис. 24. Концентрации металлов в продуктивных растворах выщелачивания руды месторождения «Ниттис-Кумужья-Травяная» (НКТ)

Наиболее интенсивно Ni выщелачивался из руды месторождения «Морошковое озеро»: за 32 дня извлечение составило более 60 %, при этом 20 % металла перешло в раствор на стадии водного выщелачивания в течение 1 суток (рис. 25а). Существенно хуже шло выщелачивание Ni из руды месторождения «Нюд Терраса»: около 10 % за тот же период. Это могло быть связано с тем, что в данной руде преобладала пылевидная вкрапленность сульфидов, и после растворения более крупных минералов на стадии водного выщелачивания последующий прирост извлечения Ni до окончания эксперимента составил менее 2 %.

Наилучшие показатели извлечения Cu были достигнуты в экспериментах с рудой месторождения НКТ — около 8 %, самые низкие, как и для Ni, — с рудой месторождения «Нюд Терраса»: 1,95 % (рис. 25б).

Интенсивности выщелачивания Cu и Ni составили в сутки, %: 1,87 и 0,13 из руды месторождения «Морошковое озеро»; 0,97 и 0,24 из руды месторождения НКТ; 0,32 и 0,06 из руды месторождения «Нюд Терраса».

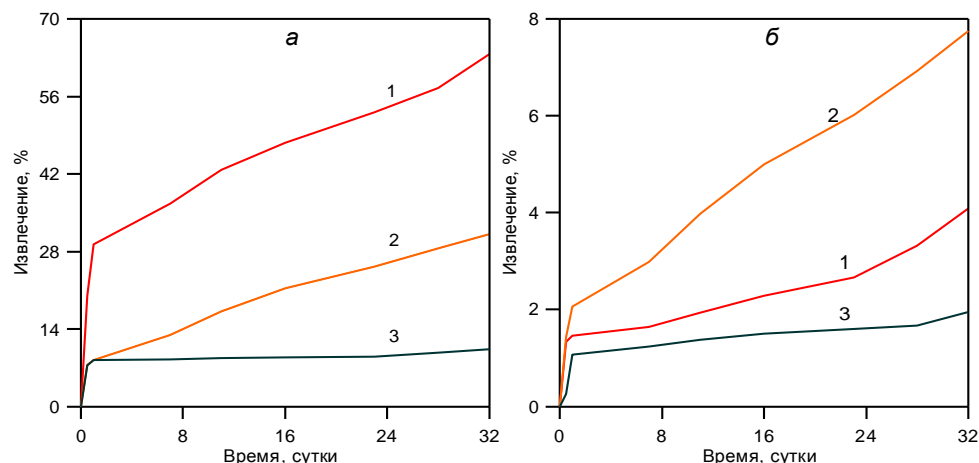


Рис. 25. Извлечение никеля (а) и меди (б) в раствор при выщелачивании руд месторождений Мончеплутона. Месторождения: 1 — «Морошковое озеро»; 2 — «Ниттис-Кумужья-Травяная» (НКТ); 3 — «Нюд Терраса»

Таким образом, серноокислотная агломерация измельченных руд приводит к существенному улучшению показателей выщелачивания из них цветных металлов. Так, при выщелачивании руды крупностью $-3+2$ мм месторождения «Морошковое озеро» интенсивности извлечения в раствор составили 0,4 8% в сутки для Ni и 0,08 % для Cu, что оказалось ниже этих показателей для руды в окатышах в 3,9 и 1,6 раз соответственно. Однако необходима оптимизация процесса агломерации, чтобы повысить крупность руды, используемой для получения окатышей. При увеличении концентрации серной кислоты, применяемой в процессе окомкования, возможно последующее водное выщелачивание с оборотом растворов.

Искусственные геохимические барьеры и сорбенты для очистки сточных вод и доизвлечения цветных металлов

Классификация геохимических барьеров

Геохимические барьеры (ГБ) – это участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрации (Перельман, 1989). На ГБ образуются рудные тела большинства месторождений. Понятие о ГБ является методологической основой изучения геохимических аномалий и, следовательно, оно важно для разработки методики геохимических поисков. Изучение барьеров важно при ликвидации загрязнений окружающей среды, организации подземного выщелачивания руд, закреплении грунтов в строительстве, решении других практических задач (Максимович, 2010).

Перспективно применение ГБ для защиты и очистки от загрязнения природных водоемов и стоков. Сущность методов заключается в переводе загрязняющих компонентов в малоподвижные формы, ГБ при этом выполняют функцию своеобразных «фильтров». Использовать можно как существующие природные, так и искусственно созданные ГБ.

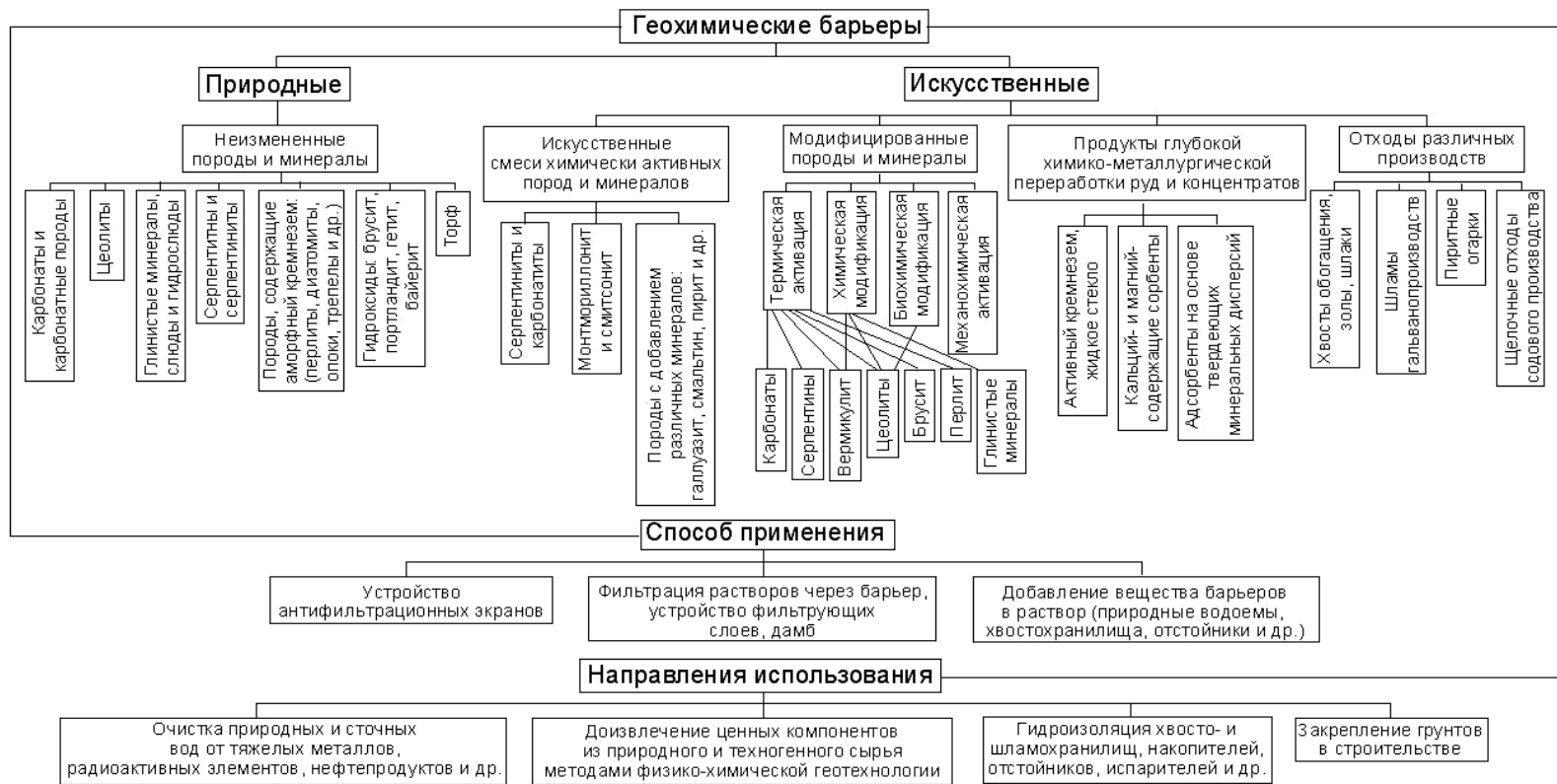


Рис. 26. Классификация геохимических барьеров (по: Chanturiya et al., 2014)

С учетом результатов многолетних исследований и литературных данных нами разработана классификация ГБ по их происхождению, способам получения, применения и направлениям использования (рис. 26). В качестве материалов для ГБ рассмотрены природные минералы и породы, искусственные смеси химически активных минералов и пород, продукты химико-металлургической переработки руд и концентратов (Chanturiya et al., 2014).

Из природных минералов наиболее широкое применение для ГБ нашли карбонаты: кальцит, доломит, магнезит (Жижаев и др., 2001; Изотов и др., 2006; Орехова, 2010). Показана эффективная очистка воды с помощью карбонатсодержащих трепелов. Карбонатные трепела с 20–30 % содержанием кальцита являются высокоэффективными сорбентами ионов тяжелых и цветных металлов, радионуклидов цезия и стронция (Мильвит и др., 2007).

При взаимодействии медьсодержащих растворов с природными карбонатами кальция происходит осаждение металла из сульфатных растворов в форме основных сульфатов (Рубановская, Величко, 2006). Использование данного механизма для осаждения меди, помимо низкой стоимости осадителя, имеет преимущества технологического плана. Создание искусственного геохимического карбонатного барьера по периметру источника загрязнения или на перехвате основных направлений дренажа растворов в рельефе или к грунтовым водам позволит отказаться от строительства установки по извлечению меди из растворов и существенно снизить капитальные затраты. В зависимости от условий залегания ГБ и газового режима возможно формирование залежи с вторичными медными минералами сульфатного или карбонатного состава.

В своих исследованиях мы моделировали добавление кальцита и доломита в водную фазу хвостохранилищ и в природные водоемы (Chanturiya et al., 2014). Опыты проводили в статических условиях. Готовили кислый ($\text{pH} = 3.6$) сульфатный раствор со следующими концентрациями металлов, г/л: Cu^{2+} — 1, Ni^{2+} — 2,8, Fe^{2+} — 3,4. Соотношение добавляемых в раствор минералов варьировали от 4 до 40 г/л. Раствор перемешивали в течение 4 часов, твердую фазу отфильтровывали и анализировали методом РФА, раствор анализировали химически. Через 90 сут раствор отфильтровывали от осадка гидроксидов железа — гетита и лепидокрокита и анализировали повторно. Установлено, что при использовании всех минералов величина pH раствора в течение 30 мин возрастала, не переходя в щелочную область, затем плавно снижалась. Наибольший рост pH обеспечивал кальцит. При использовании в качестве барьера фракции кальцита крупностью $-0,1$ мм с увеличением его расхода полнота осаждения всех металлов возрастала. При соотношении минерала и раствора 20 г/л осаждалось около 100 % Cu , 80 % Ni и 90 % Fe . Новообразованной минеральной фазой было соединение, изоструктурное гидромагнезиту. Худшие результаты были получены при использовании фракции доломита $-0,1$ мм: медь осаждалась на 30 %, никель на 15 %, железо на стадии перемешивания — на 50 %. Основной новообразованной фазой был гипс. Таким образом, карбонаты значительно лучше осаждали медь по сравнению никелем и железом, что согласуется с литературными данными.

Широкое распространение в качестве материалов для ГБ получили слоистые гидросиликаты. Предложен сорбционный способ переработки растворов с использованием глинистых материалов — ирлитов (Рубановская, Величко, 2006). В отличие от разновидностей глинистых минералов, состоящих в

основном из минералов одной группы и широко используемых в качестве сорбентов для извлечения ионов металлов из водных растворов, ирлиты имеют более сложный минералогический состав, что в большинстве случаев улучшает их сорбционные свойства. Основными минералами в составе ирлитов являются: гидрослюда, каолинит, монтмориллонит, глауконит, гидрокарбонаты, органические вещества и др. Показана эффективная сорбция ирлитами из бедных технологических растворов и сточных вод меди, цинка, свинца, кобальта, молибдена, вольфрама.

Механизмы осаждения ионов Ni и Cu из сульфатных растворов серпентинами изучали В. Н. Макаров и И. П. Кременецкая (Макаров и др., 2002, 2005б). Было показано, что для термоактивированных минералов имеет место образование никельсодержащего серпентина в результате ионного обмена с магнием и гидроксида никеля. При использовании неактивированных минералов наблюдается сорбция Ni на активных центрах (поверхностные и структурные ОН-группы).

К распространенным материалам для сорбционных ГБ, стоимость которых в десятки раз меньше искусственных, относятся цеолиты, кремни (аморфная разновидность кремнезема), диатомит, трепел, опока, активные глины, торф, асбест, вспученные вермикулит и перлит (Изотов и др., 2006). Несмотря на недостатки этих материалов — дефекты структуры, непостоянство химического состава, меньшую, чем у искусственных сорбентов, сорбционную емкость — их применение экономически более целесообразно вследствие низкой стоимости.

Высокие сорбционные свойства по отношению к ионам тяжелых металлов проявляются у минералов класса гидроксидов. Обосновано использование брусита $Mg(OH)_2$ для очистки сточных вод от тяжелых металлов и стронция (Бочкарев и др., 2007). Сорбционная емкость брусита при сопоставимых условиях применения в десятки–сотни раз превосходит таковую для природных сорбентов: цеолитов, бентонитовых глин, шунгита, торфа и т. п. В динамическом режиме брусит обеспечивает очистку водных растворов со сложным поликомпонентным составом до уровней ПДК.

Наряду с химически активными породами и минералами возможно использование их искусственных смесей. Нами предложена смесь серпентина (Печенгского рудного поля) и карбонатита (вскрышная порода Ковдорского месторождения комплексных руд, состоящая, главным образом, из кальцита и доломита) (Маслобоев и др., 2011; Chanturiya et al., 2011). При фильтрации сульфатных растворов Ni и Cu через слой смеси минералов в динамических условиях получены богатые (более 10 %) концентраты этих металлов. При моделировании возможности добавления барьера в природные водоемы, использовали воду оз. Нюдъявр, находящегося в зоне влияния комбината «Североникель». Вода содержала, мкг/л: Ni — 389; Cu — 53,7; Fe — 264; величина pH = 6,8. При соотношениях смеси минералов и раствора 10–20 г/л остаточные концентрации металлов в растворе не превысили ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

В ряде публикаций представлены примеры успешного использования продуктов и отходов химико-металлургической переработки руд и концентратов. Аморфный кремнезем может рассматриваться как крупнотоннажный побочный продукт кислотной переработки многих руд и концентратов, например, нефелинового (Маслобоев и др., 2011; Chanturiya et al., 2011). Его применение в составе ГБ обеспечивает образование осадка преимущественно основных

гидросиликатов цветных металлов, например, Ni и Co. В экспериментах использовали смесь активного кремнезема и карбоната в соотношении 1:1. Карбонат в составе барьера играет роль регулятора среды, нейтрализуя образующуюся при синтезе гидросиликатов серную кислоту и обеспечивая устойчивую щелочную реакцию растворов. В результате использования данного барьера можно получать концентраты, содержащие более 25 % Ni и Cu. Данный барьер эффективен и в технологиях очистки природных и сточных вод (Макаров и др., 2005в).

Следующий пример разработанного нашей лабораторией ГБ — смесь брусита и кальцита, полученных при солянокислотной переработке хвостов обогащения вермикулитовых руд (Мазухина и др., 2011). В качестве модельного использовали сульфатный раствор, содержащий, г/л: Cu — 0,25; Ni и Fe — по 0,5. Опыты в статических условиях показали, что при соотношении барьер:раствор 1 г/л концентрация Cu в растворе снижается почти в два раза, при соотношении 5 г/л Cu осаждается на 95,9 %; Fe — на 90–99 % при соотношении 7 г/л. Остаточная концентрация Ni даже при максимальном исследованном соотношении барьер:раствор, равном 10 г/л, снизилась лишь на 60–65 %.

К существенному увеличению величины извлечения металлов приводит термоактивация сорбента при 500 °С. При соотношении сорбент:раствор, равном 3 г/л, Cu осаждалась практически полностью (96,4 %), концентрация Fe снижалась более чем в два раза. При соотношении барьер:раствор, равном 7 г/л, в первые 5 минут извлечение металлов составило, %: Cu — 99,1; Fe — 70; Ni — 35. В течение часа ионы Cu и Fe были извлечены из раствора на 99,9 %, а концентрацию Ni удалось снизить на 80 %. При соотношении 10 г/л раствор был полностью очищен от ионов исследуемых металлов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке способов селективной и полной очистки сточных вод от ионов Ni, Cu и Fe (Мазухина и др., 2011).

Перспективным материалом для создания ГБ являются термоактивированные хвосты обогащения медно-никелевых руд Печенгского рудного поля, позволяющие концентрировать цветные металлы до содержаний, превышающих исходные содержания в хвостах Ni в 12, Cu – в 28 раз (Макаров и др., 2009).

Разработка методов модификации свойств искусственных геохимических барьеров и сорбентов

Одним из эффективных способов сокращения объема загрязненных сточных вод является их сорбционная очистка. В качестве сорбентов могут применяться как искусственные, так и природные материалы. Использование отходов производства, которые в ряде случаев являются природными сорбентами (химически активные минералы, попутные продукты и отходы глубокой химико-металлургической переработки руд и концентратов), позволяет снизить стоимость и расходы, связанные с природоохранными мероприятиями. Природные сорбенты имеют ряд недостатков, в частности, меньшую сорбционную емкость по сравнению с искусственными материалами, которую возможно повысить с помощью модификации поверхности.

Разработка селективных сорбентов для поглощения молибдена из водных сред. Очистка природных и сточных вод от молибдена в зоне разработки месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского горного массива сохраняет

свою актуальность, поскольку в природных водах этот элемент присутствует в количествах, значительно превышающих ПДК для рыбохозяйственных водоемов ($0,001 \text{ мг/дм}^3$) (Сулименко и др., 2015). Концентрации Мо в водотоках и на выпусках сточных вод горнопромышленного комплекса АО «Апатит» достигают значений 30–60 ПДК. Наиболее высокие концентрации (до 300 ПДК) связаны с поступлением подземных вод с разрабатываемых горизонтов в принимающие их поверхностные водотоки — ручьи Кристальный и Буровой в районе рудника Восточный. Источником сверхлимитного поступления Мо в природные воды являются процессы выщелачивания молибденсодержащих минералов (в первую очередь молибденита с содержанием Мо 0,4–0,5 г/т породы) в местах разработки месторождения. Практически все рудные выходы, содержащие молибденит, являются сопутствующими апатито-нефелиновым рудам и отмечены по всему Хибинскому массиву (Яковенчук и др., 1999).

Гидрогеохимия Мо хорошо изучена: за счет гидролитических взаимодействий молибдат-ионы в кислой и слабокислой средах существуют в виде различных высокозарядных анионов (Шапиро и др., 1970; Чечель, 2009). При $2 < \text{pH} < 7$ образуются однотипные достаточно устойчивые молибдатные комплексы с валентностью Мо, равной 6. В нейтральной среде ($\text{pH} = 6\text{--}7$) сосуществуют два комплекса MoO_4^{2-} (89,2–99,6 %) и HMoO_4^- (до 10,8 %). При $\text{pH} > 7$ Мо представлен высокоподвижным анионом MoO_4^{2-} . Следовательно, в поверхностных и грунтовых водах, для которых характерна щелочная среда, создаются максимально благоприятные условия для активной миграции молибдена в составе аниона MoO_4^{2-} .

Большинство существующих способов извлечения Мо из промышленных сточных вод горно-обогатительных и металлургических комбинатов разработаны для достаточно высоких исходных концентраций этого элемента (10–100 мг/л) и, как правило, эффективны в кислой среде. Способов глубокой очистки (до $0,001 \text{ мг/дм}^3$) промышленных стоков от Мо в слабощелочной и щелочной среде с низкими концентрациями фактически не существует. Сорбционные процессы в щелочной среде описываются следующими механизмами: 1) ионный обмен на гидроксильных группах оксогидроксида Са и Al, на карбоксильных группах — COOH ; 2) комплексообразование за счет взаимодействия с группами OH^- , а также с участием всех атомов кислорода элементарного звена фенилпропанзамещенных групп (метоксильных, фенильных и др.) (Зосин и др., 2007; Фогель и др., 2011; Мартемьянова и др., 2015).

Для разработки технологий селективной очистки Мо-содержащих вод из слабощелочной среды необходимы сорбенты, удовлетворяющие определенным условиям. Носитель сорбционно-активных центров должен иметь развитую удельную поверхность и способность к иммобилизации функциональных групп, и происходить, желательно, из минерального сырья Кольского полуострова. Этим требованиям удовлетворяют алюмосиликаты и глины, а также природные карбонатиты Ковдорского месторождения и материалы на их основе.

Для иммобилизации активных центров на поверхности носителя мы использовали следующие способы: термоактивацию носителя; кислотную активацию поверхности носителя; карбонизацию носителя с применением целлюлозсодержащих материалов; модифицирование поверхности носителя оксогидроксидом алюминия и кальция. В качестве источников функциональных групп использовались целлюлозосодержащие материалы — лигносульфонаты (ЛС).

Процесс термоактивации природного карбонатита способствует формированию пористой структуры. Модифицирование термоактивированного карбонатита с применением лигносульфонатов приводит к образованию дополнительных активных центров за счет иммобилизации на поверхности носителя карбоксильных, гидроксильных и метоксильных функциональных групп, образующихся в процессе пиролиза ЛС (Зосин и др., 2007). В результате исследований установлены основные сорбционные характеристики полученных сорбентов в статических и динамических условиях (Кошкина и др., 2016). Изотермы сорбции молибдена на модифицированном термокальците — сорбенте с лучшими показателями по сорбции представлены на рисунке 27.

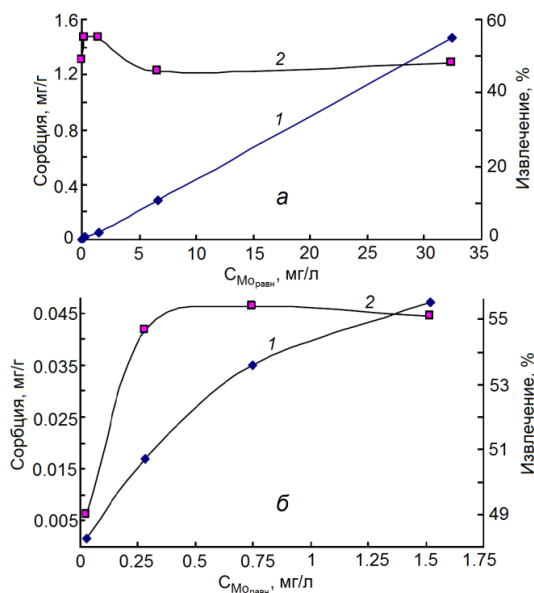


Рис. 27. Изотерма сорбции (1) и степень извлечения (2) молибдена из модельных растворов на модифицированном термокальците. Исходные концентрации молибдена, мг/л: а — от 0,06 до 61,6; б — от 0,06 до 2,5

Исследования сорбции Мо при низкой исходной концентрации (0,0012 мг/л) в динамических условиях проводили в колонке с неподвижным фильтрующим слоем и совместной загрузкой из термоактивированного и модифицированного карбонатита. Параметры колонки и условия сорбции были приближены к реальным. Раствор подавался в безнапорном режиме, самотеком. Слой термоактивированного карбонатита без модифицирования был использован для удешевления процесса, так как предварительные исследования показали достаточную эффективность извлечения Мо этим сорбентом. По результатам исследований время отработки сорбента до проскоковой концентрации, равной ПДК молибдена (0,001 мг/л), составило в выбранных условиях 21 сутки (рис. 28).

Полученные результаты показали принципиальную возможность глубокой очистки водных растворов от Мо при использовании разработанных сорбентов на основе карбонатитов. Тем не менее, для применения в промышленных условиях требуется более высокая сорбционная емкость и увеличение времени отработки сорбента в динамических условиях.

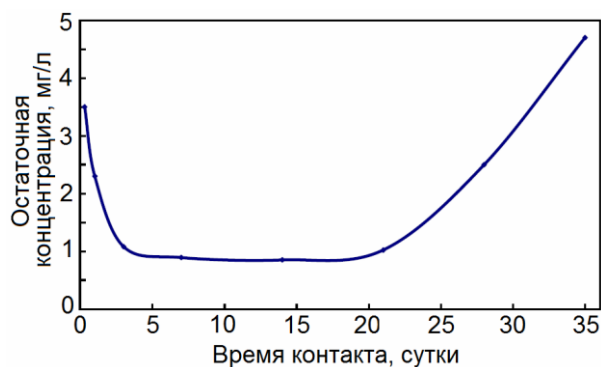


Рис. 28. Выходная кривая сорбции молибдена при постоянной линейной скорости водотока:
 $V_{\text{лин.}} = 0,25$ м/ч;
 $C_{\text{Мо исх.}} = 0,0012$ мг/л

Разработанный нефелиновый сорбент относится к классу анионоактивных тонкослойных сорбционных материалов (Зосин и др., 1991). При синтезе сорбента на основе нефелинового концентрата по технологии твердотельных минеральных дисперсий (ТМД) в процессе взаимодействия нефелина с соляной кислотой и в условиях дефицита жидкой фазы, в результате инконгруэнтного растворения на поверхности непрореагировавшего зерна образуются новообразования с малорастворимыми оксигидроксидами Al. В связи с тем, что в нефелине в кремнекислородных тетраэдрах присутствует упорядоченный изоморфизм замещения Si на Al, формирующаяся в продуктах реакции сорбционно-активная фаза оксигидрооксидов Al распределяется равномерно, что оказывает положительное влияние на сорбционные характеристики нефелинового сорбента.

Технология синтеза нефелинового сорбента включает следующие операции: предварительный помол нефелина до фиксируемой удельной поверхности; кислотную обработку при степени вскрытия 15 % с последующей сушкой; механическую активацию и фракционирование. Сорбционные свойства синтезированного материала исследованы в статических условиях при постоянной температуре +20 °С на модельных растворах с концентрацией ионов металла от 1,05 до 40 мг/л. Изотерма сорбции и изменение степени извлечения Mo из модельных растворов в указанном интервале концентраций приведены на рисунке 29.

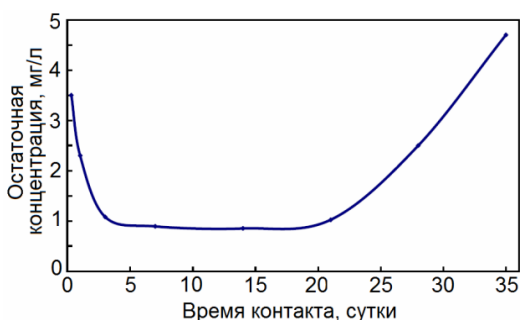


Рис. 29. Изотерма сорбции (1) и степень извлечения молибдена (2) нефелиновым сорбентом

Изотерма сорбции, согласно теории полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ), относится к I типу (Лэнгмюровская мономолекулярная сорбция), крутизна изотермы указывает на наличие в сорбентах микропор. Изотермы такого типа присущи, в основном, образцам

с относительно небольшой внешней поверхностью. Предельное количество сорбата зависит больше от доступного объема микропор, чем от площади внутренней поверхности.

Величина сорбционной емкости изменяется от 0,73 до 2,8 мг/г при возрастании исходных концентраций Мо в растворе, соответственно, от 1,05 до 40,0 мг/л. Степень извлечения Мо при низких исходных концентрациях (< 3 мг/г) составляет 99 % и не превышает уровня ПДК (< 0,001 мг/г). В сравнении с разработанным ранее сорбентом на основе доломитизированного карбоната Ковдорского месторождения нефелиновый сорбент имеет значительно лучшие сорбционные характеристики.

Таким образом, сорбент на основе нефелина является более эффективным сорбентом для очистки загрязненных стоков от молибдена и позволяет проводить глубокую очистку до значений ПДК, установленных для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Также стоит отметить простоту технологии и доступность используемого сырья. В дальнейшем исследования сорбционных свойств нефелинового сорбента будут направлены на установления механизма сорбции, определения в динамических условиях оптимальных параметров сорбции, полной и проскоковой сорбционной емкости.

Проведенный сотрудниками лаборатории мониторинг источников сверхлимитного поступления молибдена в производственные стоки АО «Апатит» (Сулименко и др., 2015) позволяет разработать систему локальной очистки с применением нефелинового сорбента.

Сорбция ионов никеля органоминеральным сорбентом. В качестве матрицы для модифицирования поверхности органическими группами использовали хвосты обогащения медно-никелевых руд Печенгского рудного поля (фракция — 0,063 мм), термоактивированные при +700 °С в течение 2 ч. В качестве органического вещества, модифицирующего поверхность природных минералов, использовали диметилглиоксим. Были найдены оптимальные параметры для модификации поверхности: наибольшие значения извлечения ионов Ni из раствора были получены при использовании сорбента, синтезированного при массе модификатора 7,5 %, температуре +90 °С и времени взаимодействия 5 ч (Баурова и др., 2016).

Изучены процессы сорбции ионов Ni⁺ в динамических условиях при различных значениях pH раствора. Установлено возрастание сорбции при pH 5,8-9,18 (рис. 30).

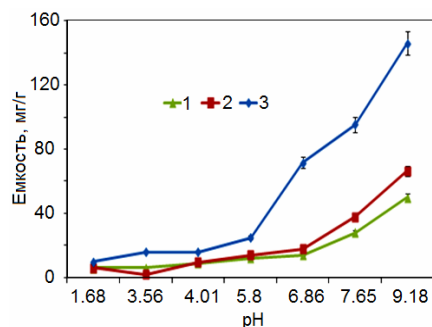


Рис. 30. Зависимость сорбции ионов никеля хвостами обогащения от pH среды. Хвосты обогащения: 1 — исходные; 2 — обожженные при +700 °С; 3 — модифицированные

Модифицирование поверхности природных минералов позволило увеличить сорбционную емкость в несколько раз (при рН = 6,86 — в 4 раза). Исследование кинетики сорбции Ni модифицированным сорбентом показало резкий рост этого процесса в течение 5 минут и максимальное извлечение при контакте в течение 30 минут, затем отмечалась некоторая десорбция (рис. 31).

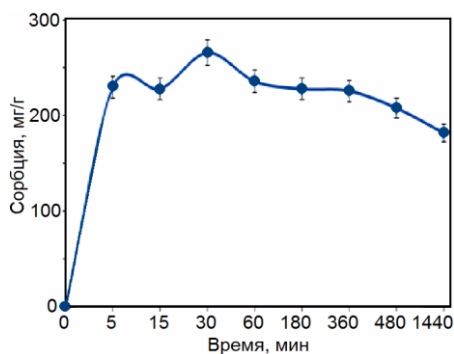


Рис. 31. Зависимость сорбции ионов никеля модифицированными хвостами обогащения от времени взаимодействия

Модифицирование поверхности значительно повышает сорбционную емкость по ионам никеля (до 220 мг/г) по сравнению как с обожженными хвостами обогащения (38 мг/г), так и с исходными (28 мг/г). Полученные значения превышают сорбционную емкость таких сорбентов, как глауконит, бентонит, брусит и др. (табл. 6).

Таблица 6

Сорбционная емкость по ионам никеля на сорбентах различной природы

Сорбент	Емкость, мг/г
Глауконит ¹	3,6
Хлопковая целлюлоза, модификатор поливинилпирролидон ²	11,7
Бентонит (содовой активации) ³	35
Брусит ⁴	95
Аморфный алюмосиликатный адсорбент ⁵	100
Обожженный брусит (600 °С) ⁴	173

Примечание. Источники данных: ¹Мартемьянов и др., 2013; ²Сионихина, Никифорова, 2011; ³Сомин и др., 2014; ⁴Мазухина и др., 2011; ⁵Шилина, Милинчук, 2010.

Эколого-технологический анализ водопользования предприятий

В течение ряда лет в лаборатории разрабатываются эколого-технологические принципы формирования устойчивого локального техногенеза в условиях Субарктики. Разработки имеют практическое применение на действующих предприятиях Мурманской области для решения проблем минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду, сокращения штрафных выплат, повышения рентабельности использования природных ресурсов и создания конкурентоспособных промышленных кластеров.

Основные направления исследований в данной области следующие:

- выявление источников загрязнения и оценка степени воздействия на состояние природной среды в районе производственной деятельности;

- эколого-технологический анализ водопользования предприятий Мурманской области с целью разработки природоохранных мероприятий;
- создание сорбентов для очистки производственных и природных вод в зоне деятельности промышленных комплексов.

Результаты комплексных исследований для разработки рациональной стратегии природопользования рассмотрены на примере двух горнопромышленных предприятий Мурманской области — медно-никелевого комплекса комбината «Североникель» АО «Кольская ГМК» и Ковдорского горно-обогатительного комбината (ГОКа).

Для медно-никелевого комплекса проведение эколого-технологического анализа позволило разработать стратегию обеспечения наименьшего воздействия на водные объекты в районе производственной деятельности и, в соответствии с этим, меры по экологической реабилитации водоемов и малых рек.

Исследованы условия формирования водообмена и качества вод озера Нюдъявр, являющегося частью зоны технологического взаимодействия медно-никелевого комбината «Североникель» с окружающей средой. Составлен водный и материальный баланс озера, включающий производственные воды, притоки впадающих в него рек, атмосферные осадки и снеготаяние. Определены количественные и качественные характеристики вод и донных отложений, участвующих в водообмене озера. Оценены условия вымывания тяжелых металлов из донных отложений. Выявлены участки динамичных слоев донных отложений.

Основные потоки, формирующие режим водообмена озера — это сброс производственных вод в его южной части (до 30 %) и приток из рек Кумужья и Травяная (около 30 %). Остальные поступления (40 %) можно отнести к склоновому стоку и подземным (грунтовым) водам, т.е. к неконтролируемым стокам. В пределах водосбора оз. Нюдъявр существует два горизонта подземных вод, которые получают основное питание от атмосферных осадков, имеют между собой гидравлическую связь, могут выклиниваться в поверхностную русловую сеть (Ананьев, 2009). Единственной рекой, по которой сбрасывается весь сток бассейна, является Ньюдай, вытекающая из северо-восточной части озера.

За время производственной деятельности в северо-западной части озера сформировались мощные (до 6 м) слои донных отложений, преобладающие во впадинах на дне. Известно, что накапливаемые в донных отложениях тяжелые цветные металлы способны не только к вымыванию при изменении гидрологического режима, но и к длительному циркулированию в экосистемах и к потенциальной биоаккумуляции живыми организмами — гидробионтами (Тарасевич и др., 1975).

Воды оз. Нюдъявр значительно отличаются по качеству от природных вод. В результате технологического воздействия заболачивание берегов озера изменяет площадь водосбора и снижает уровень его самоочищающей способности, что определяется низкой обеспеченностью биогенными элементами и пониженным уровнем pH. Вследствие известкования технологического стока в сбрасываемых водах присутствуют соли Ni, Cu, Co в виде взвешенных веществ, нефтепродукты, флотореагенты. Значительная часть загрязнений поступает на площадь водосбора в процессе аэротехногенного переноса, что подтверждено снегосъемкой в районе северной части оз. Нюдъявр (Раткин, 2002).

В соответствии со схемой поступления водных потоков в Нюдъявр были отобраны пробы донных отложений, приуроченных к трубам перетока из южной части озера в северную и к проходящему через озеро тектоническому разлому. Незначительные колебания состава донных отложений в отобранных точках свидетельствуют о едином источнике их образования. Химический анализ донных отложений показал, что концентрация цветных металлов в верхнем слое колеблется от 0,025 до 16,3 %. Содержание органического вещества в этом слое было наибольшим: 70–75 % против 50 % в среднем слое и 3–5 % — в нижнем.

Водный и материальный баланс по приоритетным загрязнителям за несколько лет, составленный по данным мониторинга, показал: на выходе из северной части озера наиболее значительный сброс загрязняющих веществ связан с неконтролируемыми, в основном, — подземными водами (рис. 32). В зависимости от водности года происходит перераспределение объемов сброса и уровня загрязнения, и в маловодные годы Ni и Cu поступают в водоем с неконтролируемыми водами в большем количестве.

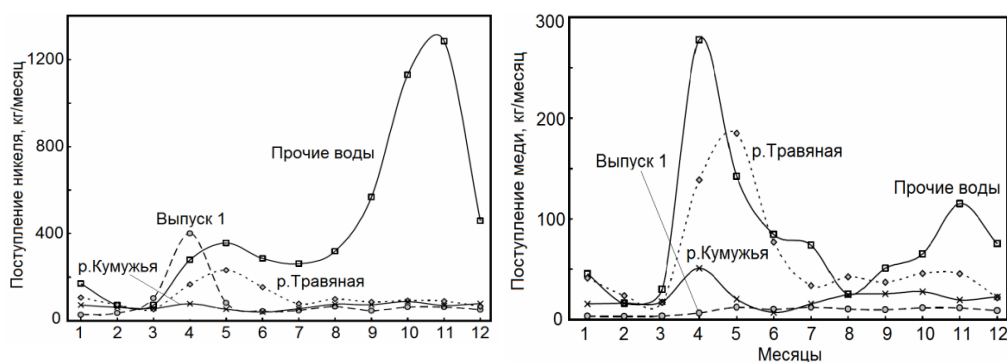


Рис. 32. Ежемесячная динамика сброса никеля и меди в северную часть озера Нюдъявр от различных источников (по данным 2010 г.)

Неконтролируемые воды имеют низкую степень загрязненности тяжелыми металлами и значения рН около 5. Поступая в оз. Нюдъявр, они меняют динамическое равновесие в системе вода–донные отложения и вымывают из последних значительную часть тяжелых металлов. На возможность протекания этих процессов указывает проведенное нами экспериментальное моделирование вымывания тяжелых металлов из донных отложений в зависимости от величины рН. Вымыванию способствуют и талые воды с величиной рН от 4,28 до 6,20. Имеет значение и форма соединения цветных металлов: их присутствие в донных отложениях в виде сульфидов снижает их вынос в раствор, тогда как органоминеральная фаза более мобильна; присутствие цветных металлов в амфотерных соединениях, диссоциирующих в широком интервале рН, способствует их выносу из донных отложений. В анаэробных условиях под действием сульфатредуцирующих микроорганизмов происходит депонирование цветных металлов в донных отложениях в нерастворимой форме (Зайнуллин и др., 1980).

По результатам исследований предложен ряд мероприятий для снижения негативного воздействия производственной деятельности медно-никелевого комбината на водные объекты: введение более совершенных технологических операций в основном производственном цикле получения Ni, Cu и Co;

совершенствование системы водооборота; создание условий для самоочищения озера за счет развития сульфатредуцирующих бактерий. Актуальным представляется применение новых экологических биотехнологий с созданием естественных эколого-геохимических барьерных зон с применением растений. Высшие водные растения (камыш озерный, тростник, рогозы) обладают высокой поглощающей способностью, достаточно неприхотливы, устойчивы к изменениям гидрологического режима и гидрохимии воды (Кравец и др., 1999).

Установка в местах перетока воды из оз. Нюдъявр в р. Нюдуаи, и далее в рыбохозяйственный водоем, касетных фильтров с загрузками на основе карбонатитов или других материалов (Пестриков и др., 2006) позволит задержать значительную часть загрязнений, связанных со взвешенными веществами, и обеспечить карбонатно-кальциевый состав сточных вод, близкий к природному (Зосин и др., 2012).

В районе Ковдорского ГОКа оценено влияние производственной деятельности на гидрохимическую и гидродинамическую обстановку. Исследовано изменение состава сточных вод в условиях фильтрации через ограждающие дамбы очистных сооружений в зависимости от состава отвальных пород и оборотной воды ГОКа. Установлены характер и степень выщелачивания загрязняющих веществ в зависимости от pH среды. Обозначены мероприятия по снижению отрицательного воздействия процесса взаимодействия дезинтегрированных отходов обогащения и породообразующих вскрышных пород с оборотной водой хвостохранилища на водные ресурсы в районе ГОКа.

Действующая система водопотребления и водопользования предприятия функционирует в условиях взаимосвязи всех развитых на исследуемой площади горизонтов подземных вод и питающих их поверхностных вод. В этих условиях качество сточных вод зависит от состава подстилающих пород и материала, из которого выполнены ограждающие дамбы и плотины (вскрышные породы, моренный грунт и хвосты обогащения). Экспериментальные исследования позволили установить, что взаимодействие отвальных пород с оборотной водой обогатительного комплекса не сопровождается увеличением концентрации Fe^{2+} , Mn^{2+} и Sr^{2+} в жидкой фазе, т.к. в результате предыдущих технологических операций вода находится в гидrolитическом равновесии с перерабатываемыми рудами. Основной фактор, влияющий на растворимость минеральных фаз — это pH контактного раствора. Переход Mn^{2+} наблюдается при высокой кислотности раствора. Основные источники поступления Sr^{2+} в раствор — фениты и пироксениты. Марганец выщелачивается также в основном из фенитов (Зосин и др., 2011). Хвосты обогащения, расположенные по откосам и в нижних слоях хранилища, взаимодействуют со слабоминерализованными атмосферными осадками и грунтовыми водами, имеющими слабую минерализацию и относящимся к карбонатно-натриевому типу. Очевидно, что взаимодействие отвальных пород с атмосферными осадками, имеющими $pH < 5,0$, или с породами, смещающими pH контактных растворов в кислую область (например, с торфом), будет сопровождаться увеличением концентрации ионных форм Mn^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} и SO_4^{2-} . Это подтверждено анализами технологических стоков хвостохранилища до и после их прохождения через дамбу. Концентрация ионной формы Mn^{2+} после прохождения через дамбу увеличилась с 0,890 до 2,060 мг/л.

Полученные результаты позволяют рекомендовать проведение технических мероприятий, направленных на стабилизацию pH сбрасываемых стоков в области

от 6 до 8 единиц путем создания геохимических барьеров на основе местных материалов после специальной обработки (Зосин и др., 1991). Фильтрация сточных вод через подобный геохимический барьер приведет к подщелачиванию воды до pH 7,0—8,5 и переходу Mn^{2+} и Sr^{2+} из ионной формы во взвешенную. Взвешенные вещества будут осаждаться в теле дамбы. Это существенно снизит их поступление в природные водоемы, водосбор которых приурочен к болотистой местности, и, соответственно, переход Mn и Sr в растворимое состояние. Для повышения эффективности геохимического барьера за счет снижения концентрации взвесей целесообразно совместное применение коагуляции и флокуляции.

Получение строительных материалов из отходов горнопромышленного комплекса

С учетом огромных объемов горнопромышленных отходов, основным их потребителем может стать наиболее материалоемкая отрасль — строительная. Одним из перспективных направлений использования отходов является получение керамических и гиперпрессованных строительных материалов: стеновых, облицовочных и тротуарных изделий. Утилизация отходов в строительные материалы направлена также на решение социальных и экологических проблем, улучшение жилищных условий населения, создание дополнительных рабочих мест. Исследования в данном направлении сотрудники лаборатории проводят совместно с коллективом лаборатории Минерального сырья и силикатного синтеза ИХТРЭМС КНЦ РАН (Суворова и др., 2010; Мелконян и др., 2016; Suvorova et al., 2013; Makarov et al., 2015).

Керамические строительные материалы

Использованию промышленных и сельскохозяйственных отходов в производстве керамических строительных материалов придается большое значение. За период 2011–2016 гг. в журнале «Construction and Building Materials» опубликовано несколько обзорных статей, посвященных этой проблеме (Raut et al., 2011; Zhang, 2013; Monteiro, Fontes, 2014; Velasco et al., 2014, 2016). В России серьезное внимание уделяется проблеме вовлечения отходов, главным образом горнопромышленного и топливно-энергетического комплексов, в производство керамических строительных материалов (Макаров и др., 2016).

В Мурманской области потенциальным сырьем для керамического производства могут стать хвосты обогащения медно-никелевых руд (АО «Кольская ГМК»), апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений (АО «Апатит») и железистых кварцитов Приимандровского района (АО «Олкон»). Ранее нами обоснована возможность получения строительных керамических материалов на основе представленного выше техногенного сырья методом компрессионного формования (Суворова и др., 2012а,б, 2013а,б; Кумарова и др., 2014). Оптимальный состав керамической массы отвечает следующему соотношению компонентов, %: хвосты обогащения медно-никелевых руд — 40, апатит-нефелиновых руд — 40, железных руд — 20.

Как известно, технология полусухого прессования (компрессионного формования) применяется для малопластичного камневидного сырья: аргиллитов, глинистых сланцев, опоковидных пород, сухарных глин, алевролитов и различных отходов промышленности (Котляр и др., 2014). Вопрос о влиянии

давления прессования на свойства керамических материалов является дискуссионным (Бадашкеева и др., 2005; Котляр и др., 2014). В этой связи изучены зависимости параметров компрессионного формования на свойства получаемых керамических материалов (рис. 32).

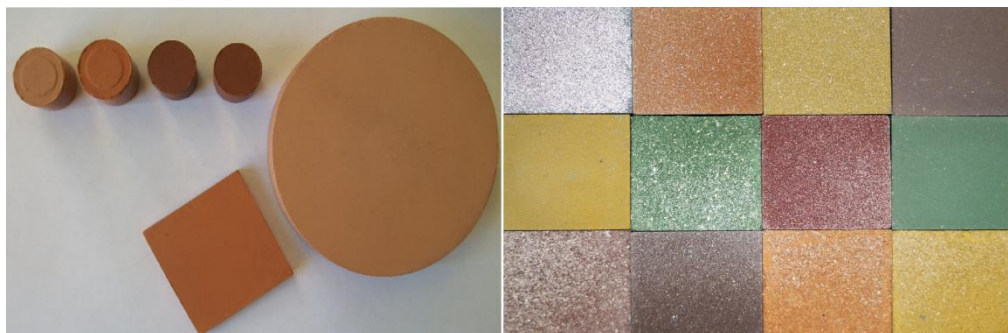


Рис. 32. Образцы керамических материалов для исследований физико-механических свойств и теплопроводности (слева) и гиперпрессованные материалы (справа)

На рисунке 33 представлено изменение прочности керамических материалов, полученных при различных температурах обжига, при сжатии и изгибе в зависимости от давления прессования. С увеличением давления прессования существенно возрастает прочность при сжатии. Материал, полученный компрессионным формованием при 150 МПа и обожженный при 900 °С, характеризуется такой же прочностью при сжатии, как и материал, полученный формованием при 20 МПа и обожженный при +1000 °С. Повышения прочности при изгибе для материалов, полученных обжигом при +900 и +950 °С, не зафиксировано. Рост прочности при изгибе с увеличением давления прессования наблюдался только для материала, обожженного при +1000 °С.

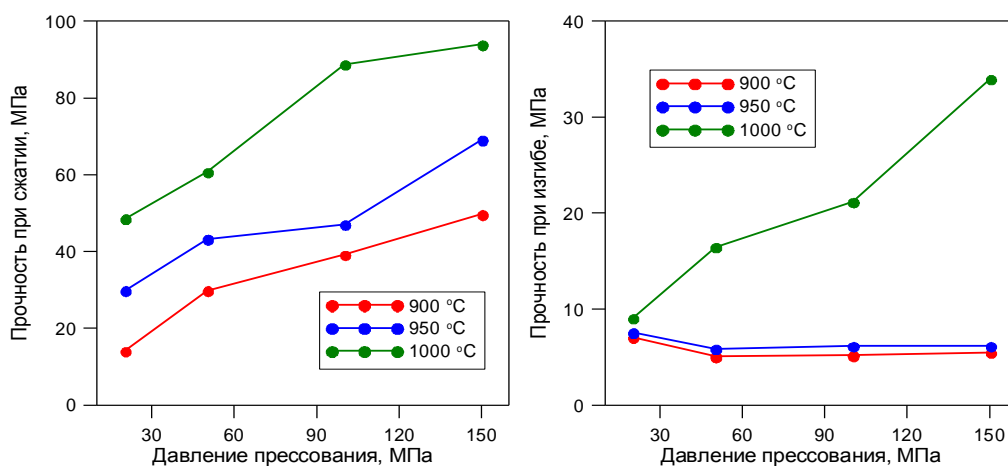


Рис. 33. Зависимость прочности керамических материалов при сжатии и изгибе от давления прессования при различных температурах обжига изделий

Положительным моментом является снижение огневой усадки и водопоглощения материалов с увеличением давления прессования при всех температурах обжига (рис. 34).

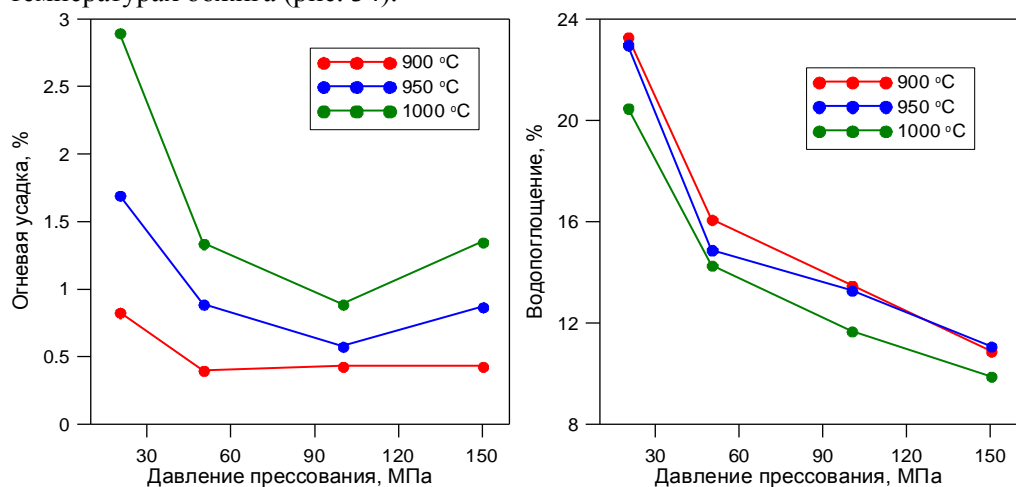


Рис. 34. Зависимости огневой усадки и водопоглощения керамических материалов от давления прессования при различных температурах обжига

Физико-механические свойства материалов, полученных при повышенных давлениях прессования и обожженных при +1050 и +1100 °С, соответствуют клинкерной керамике (Суворова и др., 2016а,б). Прочность при сжатии и изгибе материала, полученного формованием при 50 МПа и температуре обжига +1050 °С, составили 128,8 и 30,9 МПа соответственно, водопоглощение — 4,5 %. Материал, обожженный при +1100 °С, характеризовался прочностью при сжатии и изгибе 150 и 30,3 МПа, водопоглощением 0,25 %.

Гиперпрессованные строительные материалы

Гиперпрессование (трибопрессование) – метод получения строительных материалов путем взаимного трения мелкодисперсных частиц вещества под высоким давлением и когезии между ними (Макаров и др., 2006б). Смесь для изготовления изделий состоит из следующих компонентов: основного сырья (отходы горнопромышленного комплекса в объеме 65–85 %), портландцемента (марки от 300 до 500), пигмента (минеральные пигменты или мелкоперемолотые породы, 1 %) и воды (до 8–15 %). В присутствии вяжущего компонента (цемента) необходимые давления прессования и глубина помола резко уменьшаются. Их доля в зависимости от вида и марки изделия составляет от 6 до 20 %. Приготовленные изделия выдерживают на складе в течение 3–5 суток, за это время они набирают 60–70 % от конечной прочности. Время полного созревания изделий составляет 28–29 суток.

С целью сравнения эффективности использования горнопромышленных отходов различного типа для производства строительных материалов методом гиперпрессования выполнена оценка следующих параметров: присутствия рудных минералов и потенциальной стоимости вторичного сырья как техногенных руд; гранулометрического состава, влажности сырья, его объемной и истинной плотности, оказывающих существенное влияние на теплопроводность

конечной продукции; количества минералов-примесей, отнесенных к вредным для заполнителей бетонов; степени изменчивости перечисленных параметров (Макаров и др., 2006б).

Исследования взаимодействий в модельных системах: нефелин–портландит, апатит–портландит, вермикулит–портландит, сунгулит–портландит позволили обосновать возможность получения гиперпрессованных строительных материалов из отходов обогащения апатит-нефелиновых, вермикулитовых и железных руд. Например, гиперпрессованный кирпич удовлетворяет требованиям, предъявляемым к строительному кирпичу (Суворова и др., 2013б,в): имеет точную геометрическую форму, высокую прочность, декоративность, морозостойкость более 100 циклов, что важно для климатических условий заполярной Мурманской области (см. рис. 32).

Предварительные эколого-экономические расчеты показали, что отходы обогащения можно рекомендовать в качестве сырья для производства гиперпрессованных строительных материалов. Замена традиционного сырья техногенным дает экономический эффект по приведенным затратам до 265 руб/т в ценах 2012 года.

Заключение

Исследования гипергенных процессов при хранении отходов горнопромышленного комплекса на примере ряда техногенных объектов Мурманской области показали, что экологическую опасность представляют не только мелкофракционные, но и грубодисперсные сульфидсодержащие отходы, а также отвалы гранулированных шлаков медно-никелевого производства. Рекультивация отвалов и хвостохранилищ снижает экологическую нагрузку, но не обеспечивает их полную безопасность. Процесс окисления сульфидов может растягиваться на многие десятилетия, вследствие чего отвальные продукты представляют угрозу окружающей среде и после завершения разработки месторождений и вывода техногенных объектов из эксплуатации. В этой связи актуальной геоэкологической и экономической проблемой является поиск и создание новых наукоемких и экологически безопасных процессов, снижающих нагрузку сульфидсодержащих отходов на окружающую среду, а также обеспечивающих эффективное и комплексное извлечение ценных компонентов из руд и техногенного сырья.

Выполнены эксперименты по сернокислотной агломерации хвостов обогащения медно-никелевых руд. Изучено влияние концентрации серной кислоты (1–3 %) на кинетику извлечения цветных металлов из хвостов обогащения медно-никелевых руд в режиме перколяционного выщелачивания. Показано, что при использовании 1 % серной кислоты за 110 суток из хвостов обогащения в раствор извлекается более 60 % никеля.

По результатам минералого-технологических исследований бедных медно-никелевых руд Мончеплутона (месторождения «Морошковое озеро», «Нюд-II», «Нюд Терраса», «Ниттис Кумужья Травяная») обоснована возможность их переработки методом кучного выщелачивания. Показано, что сернокислотная агломерация измельченных руд существенно улучшает показатели выщелачивания, однако процесс агломерации требует оптимизации в направлении повышения крупности руды. При увеличении концентрации кислоты, применяемой в процессе окомкования, возможно последующее водное

выщелачивание с оборотом растворов. Целесообразно продолжать исследования с целью оптимизации процесса агломерации, включения в процесс выщелачивания микроорганизмов, использования оборотных растворов. Намечены возможности и перспективы промышленной реализации метода переработки бедных медно-никелевых руд и техногенных отходов методом кучного выщелачивания.

Разработана классификация геохимических барьеров по их происхождению, способам получения, и направлениям применения. В качестве материалов для геохимических барьеров рассмотрены различные неизменные минералы и породы, искусственные смеси химически активных минералов и пород, продукты химико-металлургической переработки руд и концентратов. Установлена принципиальная возможность применения геохимических барьеров для доизвлечения цветных металлов — никеля, кобальта и меди. Развитие данного научно-технического направления позволит целенаправленно формировать концентраты цветных металлов с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду.

Предложен комплексный геохимический барьер с применением сорбента на основе местного минерального сырья для снижения содержания молибдена в поверхностных водотоках в зоне деятельности АО «Апатит». В качестве исходного материала использован карбонатит Ковдорского месторождения. С целью увеличения удельной поверхности, концентрации активных центров и сорбционной емкости по извлечению молибдена применены термоактивация природного карбонатита и синтез карбоминеральных сорбентов, а также синтез сорбента на основе нефелинового концентрата твердотельных минеральных дисперсий (ТМД).

Предложен способ синтеза органоминерального сорбента на основе хвостов обогащения медно-никелевых руд АО «Кольская ГМК». Данный сорбент обладает преимуществами ковалентно-модифицированных матриц (химическая, механическая стойкость, и т.п.), лишен таких недостатков, как высокая трудоемкость процессов модификации и регенерации, и может быть использован при сооружении искусственного геохимического барьера. Сорбент испытан в лабораторных условиях. Модифицирование поверхности позволило увеличить сорбционную емкость по ионам никеля до 220 мг/г.

На примере комбината «Североникель» АО «Кольская ГМК» и АО «Ковдорский ГОК» показано, что эколого-технологический анализ позволяет разработать стратегию обеспечения наименьшего воздействия на состояние водных объектов в районе производственной деятельности горнопромышленных предприятий и меры по экологической реабилитации водоемов и малых рек.

Обоснована возможность получения высококачественных керамических и гиперпрессованных строительных материалов без использования первичного сырья на основе отходов обогащения апатит-нефелиновых, медно-никелевых, железных и вермикулитовых руд предприятий Мурманской области.

В целом анализ использования техногенного сырья в Мурманской области показывает, что объем его реализации на современном этапе составляет около 20% от годового объема сырья, поступающего с горно-добывающих предприятий. Основное направление использования сырья – заполнение пустот отработанных карьеров и рудников, а также производство щебня и песка для дорожных работ.

Необходимо констатировать, что данные по техногенным минеральным объектам Мурманской области разобщены и неполны, несмотря на работы в этом направлении, проводимые при участии институтов КНЦ РАН. Имеющиеся сведения не позволяют оценить экологическую опасность техногенного сырья и сделать обоснованный выбор технологических схем его переработки. Отсутствует единый системный подход к управлению техногенными ресурсами. Целесообразна более детальная каталогизация техногенных отходов и создание их кадастра.

В этой связи представляется необходимой разработка и реализация комплексной программы «Переработка сырья техногенных месторождений Мурманской области и предотвращение их негативного воздействия на окружающую среду» с участием институтов ФИЦ КНЦ РАН. Такая программа будет способствовать решению как экологических, так и социально-экономических проблем в зонах размещения техногенных месторождений региона. Программа предусматривает всестороннее исследование техногенных объектов: их инженерно-геологических свойств, запасов сырья, его химического, породного и минерального состава, экологической опасности, условий разработки, экономических показателей. Это позволит адаптировать к конкретным объектам предложенные ранее и разрабатываемые на перспективу сотрудниками ИППЭС и других институтов ФИЦ КНЦ РАН способы переработки сырья техногенных месторождений цветных металлов; получения новых материалов широкой номенклатуры строительного, технического, экологического назначения; очистки стоков горнорудных предприятий и вод открытых водоемов; предотвращения пылеобразования на хвостохранищах и биологической защиты окружающей среды.

Благодарности

Коллектив лаборатории признателен сотрудникам Института проблем комплексного освоения недр РАН — академику В. А. Чантурия, д.т.н. А. А. Лавриненко, к.т.н. Л. М. Саркисовой, к.т.н. Э. А. Шрадер и сотрудникам Института минералогии УрО РАН — к.г.-м.н. С. С. Потапову, ведущему геологу ООО «Координационный Центр Геологоразведка» к.г.-м.н. С. Г. Селезневу за полезные консультации, совместные исследования и обсуждение результатов. Коллектив лаборатории считает своим приятным долгом поблагодарить коллег из институтов КНЦ РАН: к.т.н. В. В. Лащук, к.т.н. О. В. Суворову, В. А. Кумарову, Д. П. Нестерова, В. Е. Плетневу (Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева); к.г.-м.н. С. М. Карпова, к.г.-м.н. В. П. Припачкина, к.г.-м.н. Е. А. Селиванову (Геологический институт) за совместную работу.

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Разработка стратегии минимизации техногенных воздействий на окружающую среду отходов горно-металлургического комплекса», № гос. рег.: АААА-А18-118021490072-9.

Литература

Адамов Э. В., Панин В. В. Биотехнология металлов: Курс лекций. М.: МИСиС. 2008. 153 с.

Ананьев В. Н. Родники земли Кольской. Мурманск: Мурманское книжное изд-во. 2009. 144 с.

Бадашкеева Е. М., Архинчева Н. В., Шукина Е. Г. Гиперпрессованные керамические материалы // Строительные материалы, 2005. № 2. С. 61–63.

Баярова Ю. Л., Котельников В. А., Макаров Д. В. Получение органоминеральных сорбентов на основе отходов ГМК и изучение их свойств // Минералогия техногенеза – 2016. Миасс: ИМин УрО РАН. 2016. С. 132–136.

Белогуб Е. В., Щербакова Е. П., Никандрова Н. К. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. М.: Наука. 2007. 160 с.

Бортникова С. Б., Гаськова О. Л., Айриянц А. А. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. М.: РАН. 2003. 117 с.

Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И., Ростовцев В. И. Интенсификация процессов рудоподготовки и сорбционного извлечения металлов из техногенного сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 3. С. 129–134.

Вигдергауз В. Е., Макаров Д. В., Зоренко И. В., Белогуб Е. В., Маляренко М. Н., Шрадер Э. А., Кузнецова И. Н. Влияние структурных особенностей медно-цинковых руд Урала на их окисление и изменение технологических свойств // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2008. № 4. С. 101–110.

Геологический словарь. М.: Недра. 1973. Т. 1. 487 с.

Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2015 году. Мурманск: Ростсервис. 2016. 166 с.

Жижяев А. М., Брагин В. И., Михайлов А. Г. Осаждение меди с использованием природных карбонатов кальция. // Обогащение руд. 2001. № 5. С. 13–17.

Зайнуллин Х. Н., Смирнова Г. Ф. и др. Применение сульфатовосстанавливающих бактерий для биохимической очистки сточных вод машиностроительных предприятий // Химия и технология воды. 1980. Т. 2. № 3. С. 272–275.

Зосин А. П., Кошкина Л. Б., Приймак Т. И., Мартынова Т. Ф. Адсорбционно-активные минералы для промышленной экологии. Апатиты: КНЦ РАН. 1991. 112 с.

Зосин А. П., Приймак Т. И., Кошкина Л. Б. Экологические аспекты процессов геохимической трансформации минеральных отходов от переработки сульфидных медно-никелевых руд // Экологическая химия. 2003. Т. 12. № 1. С. 34–42.

Зосин А. П., Приймак Т. И., Кошкина Л. Б., Калинин В. Т. Влияние катионов модификаторов на каталитические и сорбционные свойства органоминеральных материалов с закрепленными металлокомплексами // XVIII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. М. 2007. Т. 3. С. 109.

Зосин А. П., Приймак Т. И., Маслобоев В. А., Сулименко Л. П., Мингалева Т. А. Изменение состава сточных вод в системе водопользования Ковдорского горно-обогатительного комбината // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 1. С. 98–107.

Зосин А. П., Приймак Т. И., Маслобоев В. А., Сулименко Л. П., Мингалева Т. А. Анализ влияния предприятий медно-никелевого комплекса на состояние водных ресурсов ближайших объектов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 5. С. 558–568.

Изотов А. А., Ковердяев О. Н., Вершинина О. О. Способы снижения воздействия дренажных вод на окружающую среду в горнодобывающих районах // Горный журнал. 2006. № 10. С. 103–106.

Калинников В. Т., Макаров В. Н., Кременецкая И. П. Классификация горнопромышленных отходов по степени их экологической опасности. // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. № 5. С. 169–178.

Каиуба С. Г., Лесков М. И. Кучное выщелачивание в российской практике — обзор опыта и анализ перспектив. // *Золото и технологии.* 2014. № 1(23). С. 10–14.

Котляр В. Д., Терехина Ю. В., Котляр А. В. Методика испытания камневидного сырья для производства стеновых керамических изделий компрессионного формования (в порядке обсуждения) // *Строительные материалы.* 2014. № 4. С. 24–27.

Кошкина Л. Б., Сулименко Л. П., Мингалева Т. А., Макаров Д. В. Разработка сорбционно-активных материалов для очистки молибденсодержащих стоков в технологии кондиционирования молибденсодержащих стоков // *Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием.* Апатиты: КНЦ РАН. 2016. С. 256–261.

Кравец В. В., Бухгалтер Л. В., Акольвин А. П., Бухгалтер Б. Л. Высшая водная растительность как элемент очистки сточных вод // *Экология и промышленность России.* 1999. № 8. С. 20–23.

Кумарова В. А., Суворова О. В., Плетнева В. Е., Макаров Д. В. Исследования пористости керамических материалов из техногенного сырья // *Минералогия техногенеза – 2014,* Миасс: ИМин УрО РАН. 2014. С. 206–210.

Лодейщиков В. В. Переработка никелесодержащих руд методом кучного бактериального выщелачивания. Опыт финской фирмы Talvivaara // *Золотодобыча.* 2009. № 132. С. 12–14.

Лукашев К. И. Очерки по геохимии гипергенеза. Минск: АН БССР. 1963. 446 с.

Мазухина С. И., Светлов А. В., Корнева Е. А., Макаров Д. В. Физико-химическое моделирование взаимодействий в системе брусит, кальцит — раствор CuSO_4 , NiSO_4 , FeSO_4 // *Геология и геоэкология: исследования молодых: Материалы XXII конференции молодых учёных памяти чл.-корр., проф. К. О. Кратца.* Апатиты: КНЦ РАН. 2011. С. 264–268.

Макаров А. Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала. Екатеринбург: УГГУ. 2006. 206 с.

Макаров А. Б., Талалай А. Г. Техногенно-минеральные месторождения Урала (особенности состава и методологии исследования) // *Техногенез и экология. Информационно-тематический сборник.* УГГА: Екатеринбург. 1999. С. 4–41.

Макаров В. Н. Экологические проблемы утилизации горнопромышленных отходов. Апатиты: КНЦ РАН. 1998. Ч. 1. 132 с.

Макаров В. Н., Васильева Т. Н., Макаров Д. В., Алкацева А. А., Фарвазова Е. Р., Нестеров Д. П., Лацук В. В. Потенциальная экологическая опасность выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2005а. Т. 13. № 1. С. 85–93.

Макаров В. Н., Кременецкая И. П., Мазухина С. И. Сорбция меди и никеля кальцитом и сунгулитом // *Экология и развитие Северо-запада России.* СПб, 2002. С. 315–321.

Макаров В. Н., Макаров Д. В., Васильева Т. Н., Кременецкая И. П. Взаимодействие природных серпентинов с разбавленными сульфатными растворами, содержащими ионы никеля // *Журнал неорганической химии.* 2005б. Т. 50. № 9. С. 1418–1429.

Макаров В. Н., Макаров Д. В., Луговская А. С., Калинин В. Т. Способ очистки воды от ионов тяжелых металлов: Патент РФ №2259956. МПК⁷ С 02 F 1/62 // С 02 F 103:16. Опубликовано 10.09.2005в. Бюл. № 25.

Макаров Д. В., Мазухина С. И., Нестерова А. А., Нестеров Д. П., Меньшиков Ю. П., Зоренко И. В., Маслобоев В. А. Взаимодействие минералов искусственных геохимических барьеров с сульфатными растворами тяжелых металлов // Минералогия техногенеза – 2009. Миасс: ИМин УрО РАН. 2009. С. 96–103.

Макаров Д. В., Макаров В. Н., Васильева Т. Н., Фарвазова Е. Р. Изменения содержания Ni, Cu, Co, Fe, Mg в хвостах обогащения медно-никелевых руд в процессе их хранения // Инженерная экология. 2004. № 1. С. 18–28.

Макаров Д. В., Макаров В. Н., Дрогобужская С. В., Алкацева А. А., Фарвазова Е. Р., Тунина М. В. Содержания Ni, Cu, Co, Fe, MgO в поровых растворах хвостов обогащения медно-никелевых руд после их длительного хранения // Геоэкология. 2006а. № 2. С. 136–142.

Макаров Д. В., Мелконян Р. Г., Суворова О. В., Кумарова В. А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 254–281.

Макаров Д. В., Потапов Д. С., Потапов С. С., Светлов А. В. Исследование экологической опасности и потенциальной возможности извлечения полезных компонентов из гранулированных шлаков комбината «Печенганикель» ОАО «Кольская ГМК» // Экология промышленного производства. 2013. № 2. С. 54–58.

Макаров Д. В., Суворова О. В., Кулькова Н. М., Нестерова А. А. Предварительная оценка качества техногенного сырья для производства строительных материалов методом гиперпрессования // Минералогия техногенеза – 2006. Миасс: ИМин УрО РАН. 2006. С. 231–249.

Максимович Н. Г. Теоретические и прикладные аспекты использования геохимических барьеров для охраны окружающей среды // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 20–28.

Мартемьянов Д. В., Галанов А. И., Юрмазова Т. А. Определение сорбционных характеристик различных минералов при извлечении ионов As^{5+} , Cr^{6+} , Ni^{2+} из водных сред. // Фундаментальные исследования. 2013. № 8. С. 666–670.

Мартемьянова И. В., Мосолков А. Ю., Плотников Е. В., Воронова О. А., Журавков С. П., Мартемьянов Д. В., Короткова Е. И. Исследование свойств наноструктурного адсорбента. // Мир науки. 2015. № 2. Интернет-журнал. Режим доступа: <http://mir-nauki.com/PDF/25TMN215.pdf>.

Маслобоев В. А., Макаров Д. В., Мазухина С. И., Нестеров Д. П., Меньшиков Ю. П. Искусственные геохимические барьеры для доизвлечения цветных металлов и снижения экологической опасности отходов горнопромышленного комплекса // Цветные металлы. 2011. № 11. С. 56–61.

Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 3. С. 138–153.

Мелконян Р. Г., Макаров Д. В., Суворова О. В. Экологические проблемы использования техногенного сырья в производстве стекла и керамики. Апатиты: КНЦ РАН. 2016. 224 с.

Мильвит Н. В., Шаикова И. Л., Ратько А. И. и др. Сорбционные свойства карбонатсодержащих трепелов // Журнал прикладной химии. 2007. Т. 80. № 11. С. 1819–1825.

Орехова Н. Н. Концептуальные и технологические подходы к ресурсоспроизводящей переработке гидроминерального техногенного сырья // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения – 2010): Материалы международного совещания. Казань. 2010. С. 431–433.

Паришина М. В. Влияние процессов гипергенной метаморфизации техногенных массивов на степень их экологической опасности для окружающей среды // Записки Горного института. 2009. Т. 180. С. 33–35.

Перельман А. И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.

Пестриков С. В., Исаева О. Ю., Мустафин А. Г., Суяндукоев Я. Т., Ковтуненко С. В., Красногорская Н. Н. Экологические технологии: применение карбонатного эколого-геохимического барьера для удаления тяжелых металлов из водных сред // Инженерная экология. 2006. № 2. С. 8–19.

Потапов Д. С., Потапов С. С., Макаров Д. В. Минералогия гранулированных шлаков комбината «Печенганикель» // Минералогия техногенеза – 2012. Миасс: ИМин УрО РАН. 2012а. С. 95–101.

Потапов Д. С., Потапов С. С., Макаров Д. В., Корнева Е. А., Светлов А. В., Баярова Ю. Л. Исследование отвальных шлаков медно-никелевого производства ОАО «Кольская ГМК» // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы международного совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2012б. С. 329–332.

Припачкин П. В., Нерадовский Ю. Н., Федотов Ж. А., Нерович Л. И. Cu-Ni-ЭПГ и Cr месторождения Мончегорского района, Кольский п-ов, Россия // Путеводитель геологической экскурсии. Апатиты: ГИ КНЦ РАН. 2013. 44 с.

Птицын А. Б. Геохимические основы геотехнологии в условиях мерзлоты. Новосибирск: Наука. 1992. 120 с.

Птицын А. Б., Павлюкова В. А., Эпова Е. С. Криогеотехнология меди в Забайкалье // Труды Международного совещания «Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья» (Плаксинские чтения). Чита: ЧитГУ. 2002. Ч. IV. С. 106–107.

Пучков Л. А., Воробьев А. Е. Человек и биосфера: вхождение в техносферу. М.: МГГУ. 2000. 342 с.

Раткин Н. Е. Снежный покров и его роль в количественной оценке аэротехногенного загрязнения подстилающей поверхности. // Известия АН. Серия географическая. 2002. № 6. С. 46–54.

Рубановская С. Г., Величко Л. Н. Сорбция ионов тяжелых металлов природными материалами // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 2006. № 4. С. 37–39.

Руднев Б. П. Обзор мирового опыта переработки хвостов обогащения и отвалов металлургического производства обогатительными методами // Цветная металлургия. 2009а. № 4. С. 3–9.

Руднев Б. П. Создание технологии предконцентрации ценных компонентов из отвальных хвостов при их гидротранспортировании // Цветная металлургия. 2009б. № 6. С. 3–22.

Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Илимбетов А. Ф., Звягинцев А. Н. Опытно-промышленная апробация технологии выщелачивания отходов переработки медно-колчеданных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2008. № 2. С. 293–301.

Светлов А. В., Кравченко Е. А., Селиванова Е. А., Макаров Д. В. Моделирование кучного выщелачивания некондиционных медно-никелевых руд и техногенного сырья // *Минералогия техногенеза* – 2015. Миасс: ИМин УрО РАН. 2015а. С. 80–94.

Светлов А. В., Кравченко Е. А., Селиванова Е. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Маслбобоев В. А. Исследование возможности кучного выщелачивания цветных металлов из сульфидного сырья природных и техногенных объектов Мурманской области // *Экология промышленного производства*. 2015б. № 3. С. 65–70.

Светлов А. В., Макаров Д. В. Возможности биовыщелачивания некондиционных сульфидных руд цветных металлов. Перспективные объекты Мурманской области // *Минералогия техногенеза* – 2016. Миасс: ИМин УрО РАН. 2016. С. 83–98.

Селезнев С. Г., Светлов А. В., Меньшиков Ю. П., Нестеров Д. П., Макаров Д. В. Гипергенез минералов отвалов Аллареченского месторождения медно-никелевых руд и оценка экологической опасности техногенного объекта // *Минералогия техногенеза* – 2013. Миасс: ИМин УрО РАН. 2013. С. 177–190.

Сионихина А. Н., Никифорова Т. Е. Сорбция ионов тяжелых металлов из водных растворов целлюлозосодержащим сорбентом, модифицированным поливинилпирролидоном // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12. С. 773–776.

Сомин В. А., Фогель А. А., Комарова Л. Ф. Очистка воды от ионов металлов на сорбентах из древесных отходов и минерального сырья // *Анализ. Методики. Прогнозы*. 2014. № 2. С. 56–60.

Суворова О. В., Кумарова В. А., Беляевский А. Т., Макаров Д. В. Исследование влияния распределения пор по размерам на технические свойства керамического материала // *Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренц-региона в технологии строительных и технических материалов: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием*. Апатиты: КНЦ РАН. 2013а. С. 108–110.

Суворова О. В., Кумарова В. А., Макаров Д. В., Маслбобоев В. А. Керамические строительные материалы на основе отходов обогащения медно-никелевых руд // *Math Designer*. 2016а. № 1. С. 46–50.

Суворова О. В., Кумарова В. А., Некипелов Д. А., Макаров Д. В., Маслбобоев В. А. Повышение качества керамических строительных материалов на основе отходов обогащения медно-никелевых руд. // *Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России: Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Новокузнецк: СибГИУ. 2016б. С. 112–117.

Суворова О. В., Кумарова В. А., Плетнева В. Е., Макаров Д. В., Мелконян Р. Г., Беляевский А. Т., Меньшиков Ю. П. Гиперпрессованные строительные материалы из отходов обогащения апатит-нефелиновых, вермикулитовых и железных руд // *Экология промышленного производства*. 2013б. № 4. С. 12–17.

Суворова О. В., Лацук В. В., Макаров Д. В., Бокарева В. А., Кожина И. С. Исследование отходов обогащения железистых кварцитов как сырья для получения строительной керамики // *Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: Труды IX Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвящённой 60-летию Геологического института КНЦ РАН*. Апатиты: К & М. 2012а. С. 366–369.

Суворова О. В., Мелконян Р. Г., Бокарева В. А., Макаров Д. В., Беляевский А. Т., Плетнева В. Е. Обоснование получения керамических строительных материалов из отходов горнопромышленного комплекса // *Техника и технология силикатов*. 2012б. № 2. С. 19–25.

Суворова О. В., Мелконян Р. Г., Макаров Д. В., Лащук В. В. Использование техногенного сырья Мурманской области в производстве стекла и керамики // Техника и технология силикатов. 2010. № 3. С. 23–29.

Суворова О. В., Плетнева В. Е., Макаров Д. В., Кумарова В. А., Беляевский А. Т., Меньшиков Ю. П. Гиперпрессованные строительные материалы из отходов обогащения апатит-нефелиновых, вермикулитовых и железных руд // Геоэкологические проблемы переработки природного и техногенного сырья. Мурманск: МГТУ. 2013в. С. 100–112.

Сулименко Л. П., Кошкина Л. Б., Мингалева Т. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Исследование миграции молибдена в водных средах ландшафтов Хибинского массива с целью разработки природоохранных мероприятий // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 345–355.

Талалай А. Г., Макаров А. Б., Зобнин Б. Б. Техногенные месторождения Урала, методы их исследования и перспективы разработки // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1997. № 11-12. С. 20–36.

Тарасевич И. Г., Паламарчук И. К., Набиванец Б. И. К вопросу о влиянии донных отложений на формирование состава поверхностных вод // Гидробиологический журнал. 1975. Т. 11. № 6. С. 25–30.

Ферсман А. Е. Геохимия. М.: ОНТИ Госхимтехиздат. 1934. Т. II. 354 с. 1937. Т. III. 503 с.

Фогель А. А., Сомин В. А., Комаров Л. А. Изучение сорбционных свойств материалов на основе отходов производства древесины и минерального сырья // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. Т. 19. № 4. С. 461–465.

Халезов Б. Д. Исследования и разработка технологии кучного выщелачивания медных и медно-цинковых руд. Автореф. дисс. докт. техн. наук. Екатеринбург. 2009. 42 с.

Халезов Б. Д. Кучное выщелачивание медных и медно-цинковых руд: (отечественный опыт). Екатеринбург: УрО РАН. 2013. 346 с.

Чайников В. В., Крючкова Л. А. Практика использования техногенных ресурсов черной и цветной металлургии в России и за рубежом. М.: Знание. 1994. 30 с.

Чантурия В. А. Новые технологические процессы комплексного извлечения ценных компонентов из минерального сырья: современное состояние и основные направления развития // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 3. С. 235–242.

Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. 2008а. № 6. С. 71–74.

Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов: теория и практика флотации. М.: Руда и металлы. 2008б. 272 с.

Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е., Шрадер Э. А. и др. Прогрессивные (экологически значимые) технологии переработки медно-цинкового техногенного минерального сырья: проблемы и решения // Инженерная экология. 2004а. № 5. С. 3–11.

Чантурия В. А., Козлов А. П. Развитие физико-химических основ и разработка инновационных технологий глубокой переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. 2014. № 7. С. 79–84.

Чантурия В. А., Корюкин Б. М. Анализ техногенного минерального сырья Урала и перспективы его переработки // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения). Екатеринбург: УрО РАН. 1998. Т. 3. С. 26–34.

Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. Апатиты: КНЦ РАН. 2005. 218 с.

Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В., Васильева Т. Н. Формы нахождения никеля в лежалых хвостах обогащения медно-никелевых руд // Доклады РАН. 2004б. Т. 399. № 1. С. 104–106.

Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В., Васильева Т. Н., Павлов В. В., Трофименко Т. А. Влияние условий хранения на изменение свойств медно-никелевых техногенных продуктов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2002. № 6. С. 96–102.

Чантурия В. А., Макаров Д. В., Трофименко Т. А., Макаров В. Н., Васильева Т. Н. Изменение технологических свойств техногенного сульфидсодержащего сырья в процессе хранения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2000. № 3. С. 108–114.

Чантурия В. А., Миненко В. Г., Копорулина Е. В., Самусев А. Л., Чантурия Е. Л. Обоснование эффективности использования электрохимической технологии водоподготовки в процессах кучного выщелачивания руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 115–124.

Чечель Л. П. Основные формы водной миграции металлов в зоне гипергенеза вольфрамовых месторождений Агинского рудного узла (Восточное Забайкалье) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 153–158.

Шапиро К. Я., Кулакова В. В., Евстигнеева Э. Д., Зуев В. Н., Ненашева Л. А. К вопросу о ступенчатой полимеризации и деполимеризации молибдат-ионов. // Журнал неорганической химии. 1970. Т. 15. № 8. С. 2238–2242.

Шилина А. С., Милинчук В. К. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного алюмосиликатного адсорбента // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 2. С. 237–245.

Юргенсон Г. А. Криоминералогенез в техногенных массивах. // Минералогия техногенеза–2009. Миасс: ИМин УрО РАН, 2009. С. 61–75.

Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского массива. М.: Земля. 1999. 326 с.

Яхонтова Л. К., Зверева В. П. Основы минералогии гипергенеза. Владивосток: Дальнаука. 2000. 336 с.

Bhatti T. M., Bigham J. M., Vuorinen A., Tuovinen O. H. Chemical and bacterial leaching of metals from black schist sulfide minerals in shake flasks // International Journal of Mineral Processing. 2012. Vol. 110–111. P. 25–29.

Chanturiya V. A., Bunin I. Zh., Ivanova T. A., Khabarova I. A. Effect of high-power nanosecond electromagnetic pulses on disintegration process and physics-chemical properties of sulphide minerals and noble metal-containing beneficiation products // Proceedings of the XII Balkan Mineral Processing Congress. Delphi, Greece. 2007. P. 75–80.

Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Mazukhina S., Nesterov D., Men'shikov Yu. Artificial geochemical barriers for additional recovery of non-ferrous metals and reduction of ecological hazard from the mining industry waste // Journal of Environmental Science and Health. 2011. Part A. Vol. 46. № 13. P. 1579–1587.

Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D., Nesterov D., Bajurova Yu., Svetlov A., Men'shikov Yu. Geochemical barriers for environmental protection and of recovery of nonferrous metals // Journal of Environmental Science and Health. 2014. Part A. Vol. 49. № 12. P. 1409–1415.

Doyle F. M. Acid mine drainage from sulphide ore deposits // Sulphide deposits – their origin and processing. Inst Mining and Metallurgy. 1990. P. 301–310.

Halinen A.-K., Rahunen N., Kaksonen A. H., Puhakka J. A. Heap bioleaching of a complex sulfide ore: Effect of temperature on base metal extraction and bacterial compositions // *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 98. № 1–2. Part I. P. 92–100. Part II. P. 101–107.

Makarov D., Suvorova O., Kumarova V., Manakova N., Melkonyan R. Building materials from mining and concentration wastes of the Murmansk region, Russia // *Proceedings of the XVI Balkan Mineral Processing Congress*. Belgrade, Serbia. 2015. Vol. 2. P. 869–874.

Maley M., van Bronswijk W., Watling H. R. Leaching of a low-grade, copper-nickel sulfide ore 2. Impact of aeration and pH on Cu recovery during abiotic leaching // *Hydrometallurgy*. 2009a. Vol. 98. № 1–2. P. 66–72.

Maley M., van Bronswijk W., Watling H. R. Leaching of a low-grade, copper-nickel sulfide ore 3. Interactions of Cu with selected sulfide minerals // *Hydrometallurgy*. 2009b. Vol. 98. № 1–2. P. 73–80.

Masloboev V. A., Makarov D. V., Baklanov A. A., Amosov P. V., Seleznev S. G. Methods to reduce the environmental hazards of mining and processing of minerals in the Arctic regions // *IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings*. [Электронный ресурс]. Quebec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2016. 11 p. CD:\Papers\impcPaper1001.pdf.

Masloboev V. A., Makarov D. V., Nesterov D. P., Mazukhina S. I., Bocharova I. V., Menshikov Yu. P., Svetlov A. V. Geoecological validation of mechanisms and parameters of physical-chemical processes facilitating the in-depth processing of complex sulphide ores and mining wastes // *Proceeding of the Murmansk State Technical University*. 2012. Vol. 15. № 2. P. 361–368.

Monteiro S. N., Fontes V. C. M. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 599–610.

Qin W., Zhen S., Yan Z., Campbell M., Wang J., Liu K., Zhang Y. Heap bioleaching of a low-grade nickel-bearing sulfide ore containing high levels of magnesium as olivine, chlorite and antigorite. // *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 98. № 1–2. P. 58–65.

Raut S. P., Ralegaonkar R. V., Mandavgane S. A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-crete bricks. // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. P. 4037–4042.

Suvorova O. V., Kumarova V. A., Makarov D. V., Melkonyan R. G., Masloboev V. A. Mining wastes in Murmansk region, Russia, as a source of ceramic building materials // *Proceedings of the XV Balkan Mineral Processing Congress*. Sozopol, Bulgaria. 2013. Vol. 2. P. 887–889.

Svetlov A., Kravchenko E., Selivanova E., Seleznev E., Nesterov D., Makarov D., Masloboev V. Perspectives for heap leaching of non-ferrous metals (Murmansk Region, Russia) // *Journal of the Polish Mineral Engineering Society (Inzynieria Mineralna)*. 2015. № 2(36). P. 231–236.

Velasco P. M., Morales M. P., Letelier V. G., Mendivil M. A. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 125. P. 241–252.

Velasco P. M., Ortíz M. P. M., Giró M. A. M., Velasco L. M. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 63. P. 97–107.

Watling H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review // *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 84. № 1–2. P. 81–100.

Watling H. R. The bioleaching of nickel sulphides // Hydrometallurgy. 2008. Vol. 91. № 1–4. P. 70–88.

Watling H. R., Elliot A. D., Maley M., van Bronswijk W., Hunter C. Leaching of a low-grade, copper-nickel sulfide ore. 1. Key parameters impacting on Cu recovery during column bioleaching. // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 97. № 3–4. P. 204–212.

Yang C., Qin W., Lai S., Wang J., Zhang Y., Jiao F., Ren L., Zhuang T., Chang Z. Bioleaching of a low grade nickel-copper-cobalt sulfide ore // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 106. № 1–2. P. 32–37.

Zhang L. Production of bricks from waste materials – A review // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 643–655.

Zhen S., Yan Z., Zhang Y., Wang J., Campbell M., Qin W. Column bioleaching of a low grade nickel-bearing sulfide ore containing high magnesium as olivine, chlorite and antigorite // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 96. № 4. P. 337–341.

Сведения об авторах

Макаров Дмитрий Викторович,

Доктор технических наук, директор Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; makarov@inep.ksc.ru

Маслобоев Владимир Алексеевич,

Доктор технических наук, заместитель председателя ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», научный руководитель ИППЭС КНЦ РАН, Апатиты; masloboev@admksk.apatity.ru

Кошкина Людмила Борисовна,

Старший научный сотрудник лаборатории экологии промышленного производства Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН; luda.koschkina@yandex.ru

Сулименко Людмила Петровна,

Старший научный сотрудник лаборатории экологии промышленного производства Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН; gonor@list.ru

Светлов Антон Викторович,

Научный сотрудник лаборатории экологии промышленного производства Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН; svetlov@inep.ksc.ru

Мингалева Татьяна Анатольевна,

Инженер лаборатории экологии промышленного производства Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН; mingalevat@mail.ru

Денисова Юлия Леонидовна,

Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории экологии промышленного производства Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН; juliabajurova@mail.ru

Красавцева Евгения Андреевна,

Старший лаборант лаборатории экологии промышленного производства; vandeleur2012@yandex.ru

Makarov Dmitry Viktorovich,

Dr. of Sci. (Engineer), Director of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; makarov@inep.ksc.ru

Masloboev Vladimir Alekseevich,

Dr. of Sci. (Engineer), Deputy President for Science of Federal Researcher Center Kola Science Center of RAS, Apatity; masloboev@admksk.apatity.ru

Koshkina Lyudmila Borisovna,

Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; luda.koschkina@yandex.ru

Sulimenko Lyudmila Petrovna,

Senior Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; gonor@list.ru

Svetlov Anton Viktorovich,

Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; svetlov@inep.ksc.ru

Mingaleva Tat`yana Anatol`evna,

Engineer of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; mingalevat@mail.ru

Denisova Yulia Leonidovna,

PhD (Engineer), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; juliabajurova@mail.ru

Krasavtceva Evgenia Andreevna,

Senior laboratory assistant researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; vandeleur2012@yandex.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.160-179

УДК 502.51-027.21

С. И. Мазухина

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН
Лаборатория экологии промышленного производства*

МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕШЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Аннотация

Рассмотрены возможности применения различных методов моделирования для изучения состояния атмосферы, водных и наземных экосистем Мурманской области и прогнозирования их изменения под влиянием внутренних и внешних факторов. Приведены итоги моделирования процессов формирования химического состава поверхностных и подземных вод Хибинского горного массива; трансформации промежуточных продуктов распада нефти в морских и пресных водах; прогнозные расчеты по содержанию пыли в воздушном бассейне города Апатиты в зависимости от высоты пылящей поверхности хвостохранилища АО «Апатит» и направления и скорости воздушных потоков над ним.

Ключевые слова:

термодинамическое и численное моделирование, морские и пресные воды, нефтезагрязнение, мультидисперсная пыль, хвостохранилище, Мурманская область.

S. I. Mazukhina

APPLYING MODELING FOR A SOLVING OF ECOLOGICAL PROBLEMS

Abstract

There were considered possibility of applying models to study complex natural systems of the Murmansk region. Various modeling methods were applied to investigate internal and external factors influence on the change of regional geoecological systems, to study interactions mechanisms in the "water-rock-organic matter" system, to forecast

geoecological consequences of the man-made activities influence on the atmosphere, aquatic and terrestrial ecosystems in the Arctic.

Keywords:

thermodynamic and quantity modeling, Sea and fresh water, oil pollution, multi-dispersed dust, tailing dump, Murmansk region.

Введение

Математическое моделирование для изучения состояния атмосферы, водных и наземных экосистем Мурманской области и прогнозирования их изменения под влиянием внутренних и внешних факторов — традиционное направление деятельности ИППЭС КНЦ РАН. Исследования связаны с решением актуальных проблем современной геохимии, гидрологии и атмосферного переноса, в частности — с изучением распространения загрязняющих веществ в приземном слое. Для прогнозирования состояния воздушной и водной сред используются два метода моделирования: физико-химический (или термодинамический) и численный (метод конечных разностей и конечных элементов). Численное моделирование позволяет решать проблему влияния высоты пылящих поверхностей («пляжей» хвостохранилищ горнорудных предприятий) и скорости ветрового потока над ними на загрязнение приземного слоя атмосферы. Таким образом, основной областью применения результатов каждого из методов моделирования является природопользование и охрана природы.

В статье представлены результаты двух научно-исследовательских проектов: «Моделирование природных процессов и антропогенного воздействия на окружающую среду Субарктики» (2012–2014 гг.) и «Моделирование природных и техногенно-измененных систем в условиях Арктики» (2015–2018 гг.) под научным руководством д.т.н. В. А. Маслбоева. Ряд исследований проведено в сотрудничестве с ИХТРЭМС и ГоИ КНЦ РАН.

Физико-химическое моделирование природных и техногенных экосистем Мурманской области

Моделирование процессов деградации нефти в природных водах

Актуальность исследования процессов деградации нефтепродуктов в морских экосистемах Мурманской области обусловлена развитием проектов широкомасштабной транспортировки нефти в акваториях Баренцева и Белого морей. Нефть и нефтепродукты, поступающие в окружающую среду при добыче, переработке, транспортировке и аварийных разливах, являются источником серьезной экологической угрозы. Наиболее опасны последствия нефтезагрязнения морей бассейна Северного Ледовитого океана. Данные из ежегодников качества морских вод и отчетов различных организаций не содержат полного гидрохимического анализа вод Кольского и Кандалакшского заливов и не позволяют оценить текущую степень их загрязнения нефтепродуктами и, следовательно, спрогнозировать негативные последствия этого типа воздействия на морские системы.

Объектами исследования были:

- морские воды Кольского залива Баренцева моря на севере Мурманской области и Кандалакшского залива Белого моря на юге области;
- атмосферные осадки (дождевые и талые воды) в зоне влияния горнопромышленного комплекса;
- природные воды Хибинского горного массива, расположенного в центральной части области.

Основная задача заключалась в оценке возможности и эффективности использования метода физико-химического моделирования для изучения особенностей формирования ионного состава морских и пресных вод при воздействии органического вещества, главным образом — нефтепродуктов. Предполагалось не только оценить современное состояние вод, но и предложить способ прогнозирования их изменений. Основными инструментами были **программный комплекс «Селектор»** и **термодинамическая модель** взаимодействия природных вод с нефтепродуктами, адаптированная к условиям Мурманской области. В основу работы была положена концепция гидролитического диспропорционирования — процесса химического взаимодействия органического вещества с водой, приводящего к образованию органических соединений с различной степенью окисления углерода, в том числе — органических кислот, которые являются активными участниками многих гидрогеохимических процессов.

Отбор проб морской воды проводили в Кольском и Кандалакшском заливах в 2011–2013 гг. (рис. 1). Мониторинг воды в вершине Кандалакшского залива выполнен совместно с сотрудниками Кандалакшского заповедника.

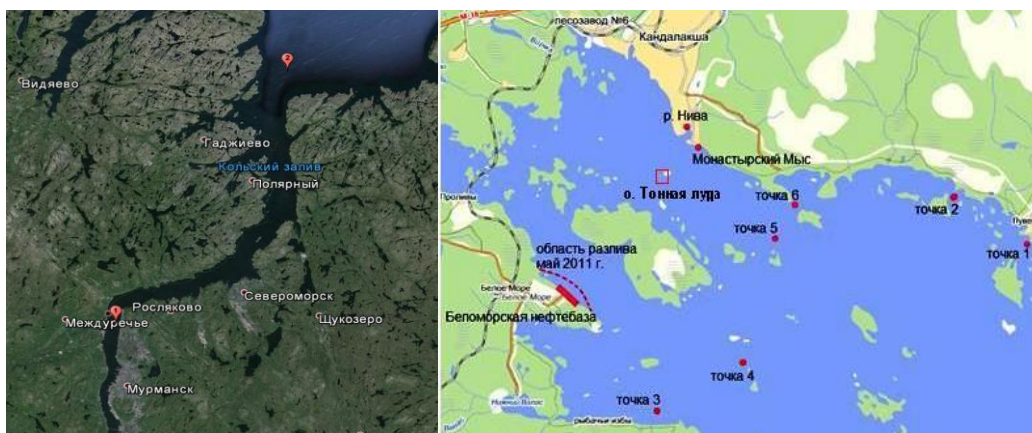


Рис. 1. Расположение точек отбора проб воды в Кольском (слева) и Кандалакшском (справа) заливах в 2011–2013 гг.

Координаты точек Кольского залива: № 1 — $69^{\circ}03,294$ с. ш., $33^{\circ}05,424$ в. д.;
№ 2 — $69^{\circ}19,133$ с. ш., $34^{\circ}06,673$ в.д.; Кандалакшского залива:
№ 1 — $67^{\circ}07,3507$ с. ш., $32^{\circ}26,1794$ в. д.; № 2 — $67^{\circ}07,3124$ с. ш., $32^{\circ}26,2627$ в. д.;
№ 3 — $67^{\circ}02,673$ с. ш., $32^{\circ}23,753$ в. д.; № 4 — $67^{\circ}03,349$ с. ш., $32^{\circ}28,152$ в. д.;
№ 5 — $67^{\circ}05,907$ с. ш., $32^{\circ}29,779$ в. д.; № 6 — $67^{\circ}06,429$ с. ш., $32^{\circ}30,539$ в. д.

В результате полного гидрохимического анализа морских вод Кольского и Кандалакшского заливов выявлено, что содержание в них Ni, Cu, Fe на несколько порядков выше в сравнении с водами Мирового океана (рис. 2).

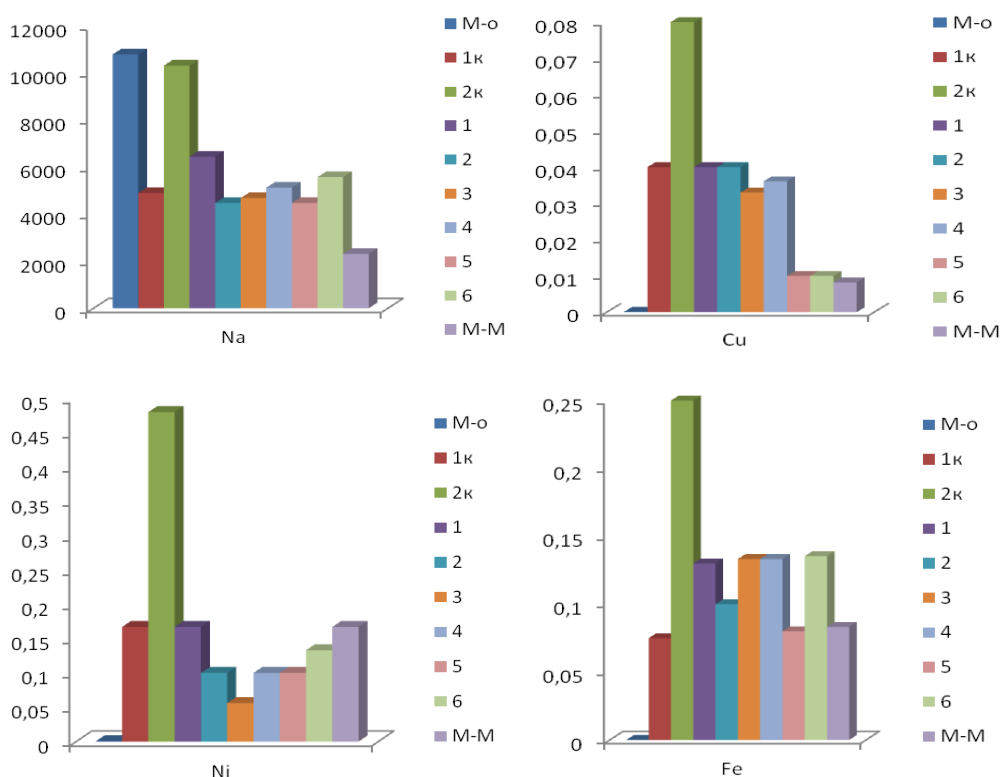


Рис. 2. Концентрации ряда элементов в морских водах (мг/л):
 М-о — мировой океан (по: Гаррелс и Крайст, 1968; Химия морей и океанов, 1995); 1к, 2к — Кольский залив Баренцева моря; 1–6 — Кандалакшский залив Белого моря; М-М — Монастырский мыс в Белом море

Моделирование процессов деструкции нефтепродуктов в морских водах.
 Одним из объектов, где могут возникать аварийные разливы нефтепродуктов, является ЗАО «Беломорская нефтебаза» в Кандалакшском заливе Белого моря. Локальная чрезвычайная ситуация в результате разлива нефтепродуктов произошла на Беломорской нефтебазе в мае 2011 года. В результате попадания нефтепродуктов в акваторию Кандалакшского залива экологический ущерб составил 2,4 млрд руб., но в тот же месяц режим чрезвычайной ситуации был отменен (Рыбчак, 2011).

Белое море — это неглубокое внутреннее море (средняя глубина 67 м, максимальная — 350 м). Его котловина отделена от Баренцева моря подводным порогом, глубиной 20–40 м, что затрудняет водообмен с этим внешним морем (Гурский, 2003) и определяет направление основных течений (рис. 3). Органическое вещество нефтяного происхождения накапливается в морях по направлению движения вод (Швец, 1970), значения Eh в придонных водах и на поверхности илов положительные (Гурский, 2003). Поскольку загрязнение вод

Белого моря продолжается многие годы, для оценки современного состояния его акватории необходимо вести мониторинг вод и илов, особенно в районе аварийных разливов, с учетом рельефа дна в связи с возможным накоплением и деструкцией органического вещества в глубоководных участках.

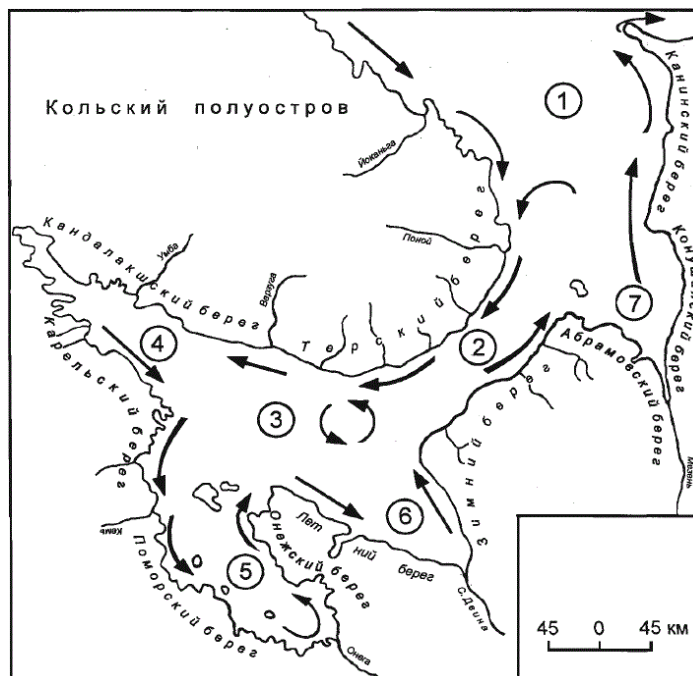


Рис. 3. Схема постоянных течений поверхностного слоя вод Белого моря (по: Мартынов, 2005): 1 — воронка; 2 — горло; 3 — бассейн. Заливы: 4 — Кандалакшский; 5 — Онежский; 6 — Двинский; 7 — Мезенский. Направление основных течений обозначено стрелками

В июне–июле 2012 года был проведен отбор проб поверхностных и придонных вод в нескольких точках залива (№№ 3–6, рис. 1), которые были выбраны в полосе прилива, а также иных сред в зоне антропогенного воздействия со стороны нефтебазы (рис. 1). Лабораторные исследования проб включали измерение pH воды потенциометрическим методом без предварительной фильтрации; определение содержания элементов методами атомно-абсорбционной (Ca, Mg, K, Na) и эмиссионной (Al, Fe, Zn, Mn, Cu, Ni) спектрометрии и фотоколориметрии (Si, общий P, фосфаты); анионного состава вод (NO_3^- , SO_4^{2-} и Cl) — методом ионообменной хроматографии (аналитик Е. О. Киселева).

Результаты моделирования химического состава донных вод, отобранных в точке 3 (рис. 1), указывают на отсутствие кислорода ($E_h < 0$) на фоне высокого содержания углекислого газа CO_2 и гидрокарбонат-ионов HCO_3^- (рис. 4). Такие условия соответствуют трансформации углеводов, которые попали в район отбора проб либо во время аварийного разлива в мае 2011 года, либо в результате постоянного подтока нефтепродуктов от нефтебазы.

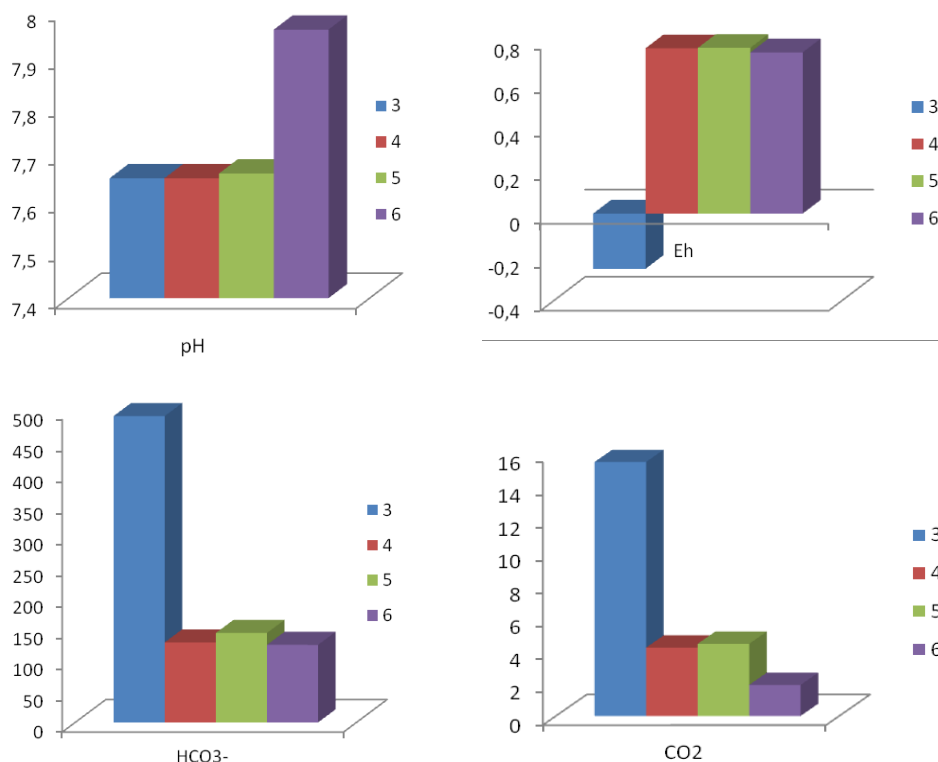


Рис. 4. Значения гидрохимических показателей в точках отбора проб воды в Кандалакшском заливе. Глубина отбора по точкам: № 3 — 15 м, № 4 — 20 м, № 5 — 14 м, № 6 — 9 м. Содержание CO₂ и HCO₃⁻ приведено в мг/л

Низкие (< 100 мВ) значения Eh (окислительного потенциала системы) в поверхностных слоях донных отложений соответствуют высокой органической нагрузке, критической для бентосных организмов (Иванов, 2007). Таким образом, результаты моделирования свидетельствует о явном неблагополучии экологических условий для донной фауны в окрестностях Беломорской нефтебазы, причиной чего были последствия катастрофы в виде продолжавшегося разложения углеводородов в придонных водах залива. Рекомендуется продолжать мониторинговую экспресс-оценку окислительных условий в грунте и придонных водах в районе нефтебазы.

Результаты моделирования нашли подтверждение в итогах федерального мониторинга прибрежно-шельфовой зоны Белого моря, который проводился АО «Севморгео» с 2001 по 2011 гг. (Корнеев и др., 2012). В отчете «Севморгео» в 2009 году зафиксировано отсутствие зоны окисления при отборе проб донных отложений на Кандалакшском рейде напротив порта. Поверхность донных отложений была покрыта черными илами, содержащими повышенные концентрации тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Наши исследования показывают, что лишь использование информационных технологий дает объективную картину чрезвычайной ситуации. Физико-химическое моделирование позволяет не только оценить уже

сложившуюся ситуацию, но и воссоздать ее возникновение и развитие и спрогнозировать будущие сценарии.

Моделирование взаимодействия в системе «нефть-вода». Цель исследования состояла в определении различий во взаимодействии системы «нефть-вода» для морских и пресных вод с использованием метода физико-химического моделирования.

Объектами исследования были пресные воды реки Нива (Кандалакшский район Мурманской области), воды горного озера Большой Вудъявр, насыщенные газами атмосферные (дождевые) воды, морские воды Кольского (рис. 1, точка № 2) и Кандалакшского заливов (рис. 1, Монастырский мыс). Отбор проб вод в Кандалакшском заливе проведен во время экспедиции в сентябре 2011 года. Воды Кольского залива апробированы в октябре 2011 года. Аналитические данные по химическому составу воды р. Нива заимствованы из справочника Центра мониторинга окружающей среды Мурманской области за 2007 год (Справка ..., 2008). Химический состав вод оз. Большой Вудъявр восстановлен после экологической катастрофы 1930-х гг. с помощью физико-химического моделирования (Мазухина 2012, Калининков и др., 2013). Состав чистых дождевых вод ($pH = 5,6$) смоделирован как взаимодействие 1 кг атмосферы и 1000 кг воды. Состав нефти рассчитан в масс. %: С — 86, Н — 13 (Эрих, 1969).

На основании аналитических данных были созданы термодинамические модели пресных и морских вод (Мазухина, 2012) и изучены различные сценарии взаимодействия морской и пресной воды (1000 кг) с нефтью (100 г), при которых количество нефти учитывалось в зависимости от степени взаимодействия $10^{-\xi}$. В моделях значение ξ варьировало от 3 до -2 , что соответствовало изменению содержания нефти в системе «вода-нефть» от 0,1 мг/л до 10 г/л. Все расчеты проведены для температуры $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферного давления $P = 1$ бар.

Были сделаны следующие допущения: 1) взаимодействие воды (морской/пресной) с нефтью происходит в закрытых, относительно атмосферы, условиях (в природных системах это может соответствовать постоянному подтоку нефти в водную среду); 2) конечными продуктами разложения нефти являются CO_2 и CH_4 ; 3) расчеты выполняются с азотфиксацией (с образованием в восстановительных условиях NH_3 и NH_4^+) и без нее.

В результате моделирования во взаимодействии морских и пресных вод в системе «вода-нефть» выявлены как сходства, так и различия для основных гидрогеохимических показателей: изменение значений pH ; возникновение окислительно-восстановительного барьера; образование органокомплексов и состав новообразованных фаз; формирование сероводородной азотно-углекислой метановой атмосферы в газовой фазе в морских водах.

Характер изменения показателей pH и Eh в системе «вода-нефть» в зависимости от степени взаимодействия с нефтью иллюстрирует возникновение окислительно-восстановительного барьера в морских ($0,1 < \xi < 0,08$) и пресных водах ($\xi = 0,07$) (рис. 5). В пресных водах значения pH смещены в более кислую область, в морских водах этого не происходит из-за карбонатов, которые образуются не при любых значениях ξ , а лишь в диапазонах $3 < \xi < 2$ и $-0,5 < \xi < -2$ (точка № 2). В газовой фазе формируется сероводородная азотно-углекислая метановая атмосфера. Образование иона NH_4^+ не оказывает существенного влияния на изменение значений pH морских вод, в пресных же водах это приводит к формированию щелочной среды.

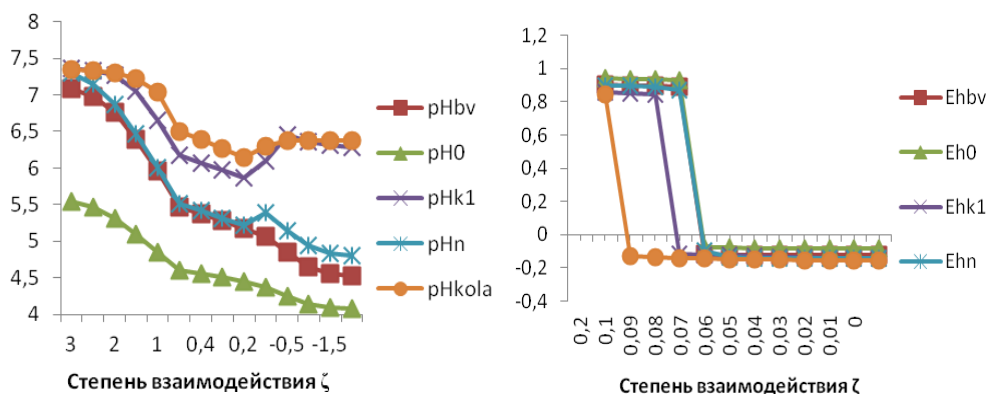


Рис. 5. Изменение показателей pH и Eh в системе «вода-нефть» в зависимости от степени взаимодействия с нефтью.

Источники воды: 0 — дождевая вода; bv — оз. Большой Вудъявр;

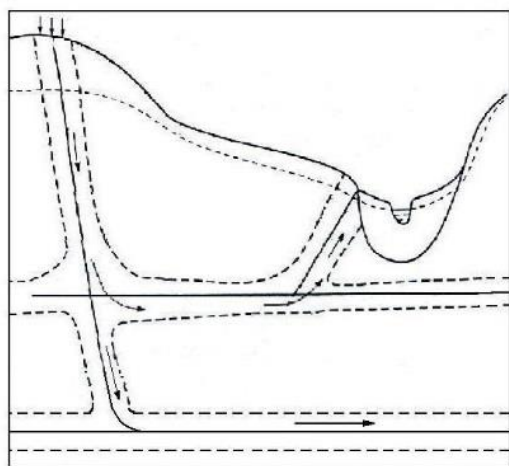
n — р. Нива; k1 — Кандалакшский залив (точка № 1),

kola — Кольский залив (точка № 2)

Определение физико-химических факторов некондиционности природных вод Хибинского горного массива

Проблема использования вод Хибинского массива для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения связана с их некондиционностью по уровню pH и содержанию фтора и алюминия.

В вертикальном разрезе массива различают три гидрогеологические подзоны: верхнюю или зону аэрации, среднюю и нижнюю (рис. 6).



Обозначения:




-  уровень подземных вод;
-  направление движения подземных вод;
-  область питания подземных вод.

Рис. 6. Схема движения подземных вод в Хибинском горном массиве (Калинников и др., 2014)

Процессы формирования поверхностных и подземных вод в пределах Хибинского массива были проанализированы с использованием 4-резервуарной физико-химической модели системы «вода – порода – атмосфера – углерод» (Мазухина, Сандимиров, 2005; Мазухина и др., 2010; Mazukhina et al., 2012) (рис. 7). В модели учитывали кларковые концентрации ряда элементов — S, Cl, F, C (Кухаренко и др., 1968) с целью определения их влияния на химический состав водных растворов.

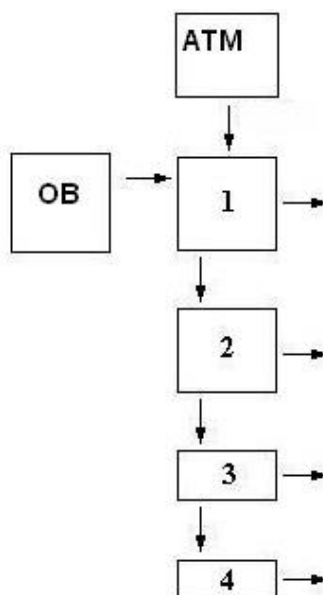


Рис. 7. Схема 4-резервуарной имитационной модели взаимодействия «вода-порода-атмосфера-органическое вещество»: АТМ — атмосфера; ОВ — органическое вещество

Показано, что формирование химического состава вод третьей подзоны происходит в результате взаимодействия поверхностных (речных) вод с породой. Время их взаимодействия и температура являются основными факторами, влияющими на окислительно-восстановительные условия, которые способствуют содообразованию и связанному с этим процессом резкому скачку концентраций гидрокарбонат-ионов HCO_3^- , F и Al (Калинников и др., 2014).

Подземные воды, распространенные в коренных породах и четвертичных отложениях, образуют взаимосвязанные водоносные горизонты, поэтому усиленная эксплуатация водоносных скважин, как правило, приводит к «подсосу» некондиционных вод из глубин. Во избежание подобного эффекта необходимо предусмотреть аэрацию воды — закачивание кислородсодержащих вод в скважины, предназначенные для питьевого водоснабжения, или использовать иные способы водоподготовки с учетом установленного факта (табл. 1, резервуар № 4).

Разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования химического состава природных вод Арктики.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса взаимодействия поверхностных вод
(река Кунийок) с породами Хибинского горного массива

Параметры	Поверхностные воды	Резервуары			
		1	2	3	4
T, °C	–	5	5	5	10
P, бар	–	1	2	2	3
pH	7,26	7,43	7,40	7,3409	9,12204
Eh, В	–	0,810	0,811	0,805	-0,33369
Элементы (ионы), мг/л					
Al	–	7,56E-06	7,33E-06	6,94E-06	2,04E-04
C	–	3,53	4,15	6,70	10,8
Ca ⁺²	0,25	3,57E-01	5,14E-01	1,17	2,07
Mg ⁺²	0,4	4,36E-01	4,98E-01	7,51E-01	1,03E-01
K ⁺	1,95	1,95	1,94	1,93	1,04
Na ⁺	5,22	5,95	7,12	11,9	19,9
Fe	–	7,00E-09	7,16E-09	7,50E-09	2,01E-04
Sr ⁺²	0,016	2,66E-02	4,37E-02	1,14E-01	4,44E-02
CO ₂ ⁰	0,88	1,36	1,71	3,12	8,03E-02
O ₂ ⁰	–	10,5	8,82	1,96	–
CH ₄	–	–	–	–	2,85E-05
HS-	–	–	–	–	1,69E-03
NH ₃	–	–	–	–	4,59E-01
HCO ₃ ⁻	17,67	16,0	18,7	29,6	52,3
F ⁻	–	2,25E-02	5,71E-02	2,01E-01	4,38E-01
Cl ⁻	0,78	9,64E-01	1,26	2,48	4,49
SO ₄ ⁻²	2,88	3,18	3,69	5,76	4,18E-03
SiO ₂ ⁰	–	3,93	3,93	3,93	5,35
H ₄ SiO ₄ ⁰	9,18	–	–	–	–
P	–	3,78E-03	1,68E-03	3,45E-04	8,59E-07
Mn	–	–	–	–	7,35E-02
Твердые фазы, мг/л					
SiO ₂	–	7,66E-02	1,12E-01	3,51E-01	4,55E-01
FeS ₂	–	–	–	–	4,41E-02
FeO(OH)	–	5,43E-03	1,13E-02	3,99E-02	–
FeCO ₃	–	–	–	–	3,47E-08
CaCO ₃	–	–	–	–	1,97E-03
MnCO ₃	–	–	–	–	2,24E-03
SrCO ₃	–	–	–	–	1,93E-03
Apt	–	9,48E-05	2,84E-04	1,01E-03	1,86E-03
Msc	–	1,39E-02	2,89E-02	1,02E-01	1,80E-01
MnO ₂	–	2,53E-04	5,28E-04	1,86E-03	–
Смектиты*	–	–	–	–	1,36E-02
Селадониты*	–	–	–	–	3,02E-02

Примечание. *Смектиты — Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂, селадониты — KFeAlSi₄O₁₀(OH)₂.

Определение состояния подземных вод Хибинского массива

В результате изучения взаимодействия в системе «вода-порода-атмосфера» с помощью физико-химического моделирования и определения изотопного состава воды (анализ содержания тяжелых изотопов водорода δ²H и кислорода δ¹⁸O, ‰) установлено происхождение подземных вод Хибинского массива, используемых для питья (Гудков и др., 2015). Исследована вода из родника

«Прихибинский» (9-й километр автодороги Апатиты-Кировск); вода, поступающая из скважин на 23-м километре автодороги (источник № 1) и возле Хибинского женского монастыря (мкр. 23 км г. Кировска) (источник № 2).

Высокие концентрации Na, Ca, K и HCO_3^- в воде обоих источников могут быть следствием как их значительной глубины, так и влияния антропогенных вод. Сходство концентраций основных катионов и анионов в источниках с такими показателями вод реки Юкспоррйок и озера Большой Вудъявр, а также высокие концентрации аниона NO_3^- , свидетельствуют о влиянии антропогенно-измененных поверхностных вод на химический состав воды в исследованных скважинах (рис. 8). Сезонные изменения содержания изотопов водорода и кислорода в скважинах не отличаются от их сезонной динамики в поверхностных водах Хибин.

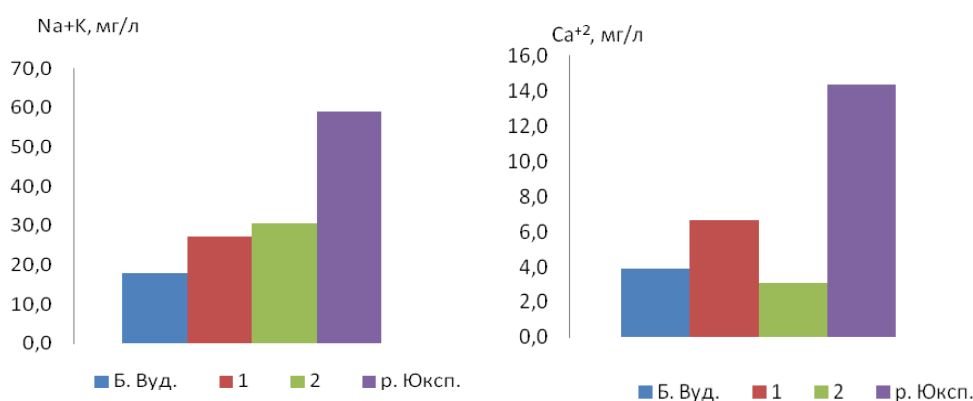


Рис. 8. Результаты анализа химического состава подземных вод источников № 1 и № 2 (2014 г.) и поверхностных вод озера Большой Вудъявр и реки Юкспоррйок (среднее значение за 1993–1997 гг.).

Химический состав и изотопный анализ воды в роднике «Прихибинский» указывают на комплексный характер питания за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных зон разломов горных пород.

Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ

В 80–90 гг. сотрудники Кольского научного центра РАН под руководством А. А. Бакланова выполняли работы по численному моделированию распространения пыли на ближайшем к городу Апатиты хранилище «хвостов» — отходов обогащения руд апатито-нефелиновой фабрики АНОФ-2 (Бакланов, 1988; Baklanov, Rigina, 1998). Расчеты выполнялись по авторским моделям и компьютерным программам, в которых уравнения, описывающие процессы аэротермогазодинамики, решались конечно-разностными методами на неравномерных прямоугольных сетках. Представляется, что именно на основе математического моделирования можно решать проблему влияния высоты и геометрической формы хвостохранилища на изменение воздушных потоков над пылящими поверхностями и прогнозировать содержание пыли в воздушном бассейне при неблагоприятных метеорологических условиях.

В 2012–2015 гг. в рамках задачи «Численное моделирование переноса загрязнений в приземном слое атмосферы с пылящих поверхностей хвостохранилищ (на примере хранилища отходов обогащения АНОФ-2)» проводилась оценка влияния высоты пляжа хвостохранилища на потенциальное загрязнение воздушной среды при переносе мультidisперсной пыли, сдуваемой сильным ветром с поверхности пляжа. Основными исполнителями этого проекта были д.ф.-м.н., профессор А. А. Бакланов и к.т.н. П. В. Амосов.

Расчет аэродинамических параметров обтекания и конвективно-диффузионного переноса мультidisперсной пыли при вариации высоты пылящей поверхности на основе двухмерной CFD-модели в программе COMSOL позволил спрогнозировать существенное (от 50 до 150 %) возрастание загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по потоку с ростом высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 (Амосов, Бакланов, 2012а, 2012б; Amosov, Baklanov, 2012). Аналогичную объективную оценку потенциального воздействия загрязнения необходимо провести для принятия решения по наращиванию высоты дамбы хвостохранилища от отметки 180 м до 200 м. В качестве инструмента исследования предложено использовать (после определенной адаптации) авторские программы, ранее разработанные в ИППЭС КНЦ РАН, а также компьютерный код COMSOL.

Более сложными и объемными задачами были:

- подготовка и обоснование базовых параметров трехмерной цифровой модели района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты», необходимых для построения компьютерной модели в программной среде COMSOL;

- создание и тестирование трехмерных цифровых компьютерных моделей, позволяющих для района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты» выполнять прогнозные оценки влияния высоты пылящей поверхности на уровень загрязнения атмосферы и ее приземного слоя в г. Апатиты;

- адаптация компьютерных программ ИППЭС КНЦ РАН, разработанных для расчета аэротермодинамических параметров и переноса загрязнений (радионуклидов) под проблему распространения радиоактивных веществ в случае аварийного выброса на Кольской АЭС.

Создание цифровых трехмерных компьютерных моделей района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты», позволяющих выполнять прогнозную оценку влияния высоты пылящей поверхности хвостохранилища на уровень загрязнения атмосферы и земной поверхности в г. Апатиты, стало главным итогом НИР (Маслобоев и др., 2013, 2014). На базе этих моделей выполнены все последующие численные эксперименты в объемной постановке.

Отдельной задачей было численное моделирование турбулентного переноса и пространственного распределения разноразмерной мультidisперсной пыли. Было спрогнозировано, что при линейном увеличении интенсивности пыления на 30 % в районе г. Апатиты на 10–15 % возрастет концентрация пылевых частиц крупностью до 60 мкм и от 60 до 100 мкм. Анализ поперечного переноса пыли выявил, что наиболее подвержен загрязнению приземный слой воздуха в районе «Старые Апатиты» (Амосов, 2014; Amosov et al., 2014). Расчет количества пылевых частиц в единице объема воздуха показал, что, несмотря на низкие количественные показатели массовой концентрации мелкодисперсной пыли, именно этот размерный класс представляет наибольшую угрозу для

здоровья человека. Оценка эффективности мероприятий, проводимых природоохранной службой АО «Апатит» по снижению интенсивности пыления пляжей хвостохранилища, выполненная на основании расчетов продольного распределения пылевых выбросов в районе г. Апатиты, свидетельствует: концентрации пыли снижаются пропорционально увеличению эффективности защитных мероприятий.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на заседаниях Координационного совета по промышленной и экологической безопасности МЧС Мурманской области, на общественных слушаниях по проблеме реконструкции хвостохранилища АНОФ-2 до отметки 200 м (г. Апатиты, 18 ноября 2014 г.), на совместных совещаниях с представителями АО «Апатит», на российских и международных научных конференциях. В 2013–2014 гг. выполнялся хозяйственный договор по проблеме оценки влияния увеличения проектной высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 на загрязнение приземного слоя атмосферы в районе г. Апатиты.

В рамках НИР 2015–2017 гг. решалась задача «Исследование влияния скорости ветрового потока на загрязнения приземного слоя атмосферы при фиксированной высоте пляжа хвостохранилища (на примере хвостохранилища АНОФ-2)» (основные исполнители д.ф.-м.н., профессор А. А. Бакланов и к.т.н. П. В. Амосов).

Итогом исследований 2015 года стала разработка базы методов численного моделирования по оценке интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2 при изменении референтной скорости ветрового потока и высоты пылящей поверхности. Определены подходы к оценке горизонтального и вертикального потоков массы пыли, наиболее приемлемые для решения практической задачи о влиянии скорости ветрового потока над хвостохранилищем на загрязнение атмосферы. Предложен переход к определению динамической скорости переноса пыли и скорости на высоте +10 (+9) м над пылящей поверхностью, необходимых для выполнения прогнозных расчетов горизонтального и вертикального потоков пылевой массы. Предложение апробировано на численной модели аэродинамики атмосферы в районе «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты» (Амосов, Бакланов, 2015а,б; Amosov, Baklanov, 2015) (рис. 9).

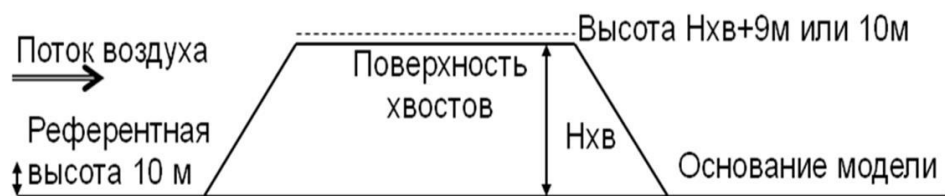


Рис. 9. Расчетная схема модели аэродинамики атмосферы в районе «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты»

Сравнительный анализ расчетных кривых вертикального потока пыли (схемы DEAD и GOCART, зависимости О. Е. Семенова и D. L. Westphal) на примере разработанной модели аэродинамики при максимальной проектной высоте хвостохранилища и вариации скорости ветрового потока в широком

диапазоне (5–23 м/с) оказал, что наиболее приемлемыми для последующих исследований загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по ветровому потоку можно считать схему DEAD (Marticorena, Bergametti, 1995) и зависимость D. L. Westphal (Westphal et al., 1988). Оба способа базируются на функциональной зависимости потока массы пыли от динамической скорости ветра на высоте пыления в 3-й и 4-й степенях соответственно (Маслобоев и др., 2016а-г).

Для численного моделирования процессов переноса пыли в трехмерной постановке необходимы компьютерные модели, позволяющие выполнять расчет аэродинамических параметров — поля скорости, коэффициентов турбулентной диффузии и др. За основу была принята трехмерная компьютерная модель площадки «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты» при максимальной проектной высоте пылящей поверхности 200 м (Амосов и др., 2014; Amosov et al., 2014). В 2016 году выполнены модернизация и корректировка этой модели с проверкой на тестовых расчетах. Модернизация была обусловлена новой возможностью задавать сложные граничные условия (например, в форме функций пространственных переменных) и анализировать расчетные данные посредством встроенных в COMSOL функций, не привлекая дополнительные программные продукты (Grapher, Surfer, Excel и др.), что существенно уменьшило время на обработку результатов численных экспериментов. Определенную корректировку аэродинамическая модель претерпела в части выбора демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых, что обеспечило устойчивость расчетов в широком диапазоне скоростей, задаваемых на границе модели.

Можно выделить два основных этапа модернизации и корректировки: 1 — использование на входной границе модели логарифмического профиля скорости, учитывающего шероховатость подстилающей поверхности; 2 — подбор решателей и демпфирующих коэффициентов с целью снижения искусственной вязкости для уравнения сохранения импульса и уравнений $(k - \varepsilon)$ -модели, обеспечивающих устойчивость счета на всем диапазоне скоростей ветрового потока на высоте +10 м U_{10} от основания модели. На базе модернизированных моделей выполнены расчеты аэродинамических параметров в диапазоне скорости ветра U_{10} от 5 до 23 м/с. Результаты численных экспериментов прошли качественный и количественный анализ. Отмечена физичность аэродинамических параметров по всей области моделирования.

В соответствии с предложенным и апробированным подходом (Маслобоев и др., 2016а-г) выполнено осреднение горизонтальной скорости в центральном сечении модели и переход к динамической скорости на высоте пыления, необходимой для оценки вертикального потока массы. Результаты приведены в таблице 2.

Аналогичная процедура осреднения и перехода через число Прандтля-Шмидта и плотность воздуха проведена для коэффициента динамической турбулентной вязкости на высоте +10 м над пылящей поверхностью (в центральном сечении модели) с целью оценки коэффициентов турбулентной диффузии.

Дополнительно, воспользовавшись встроенной опцией интегрирования по областям моделирования, пересчитаны осредненные по объему модели коэффициенты динамической турбулентной вязкости и коэффициенты

турбулентной диффузии. Результаты обоих переходов, как на высоте +10 м над пылящей поверхностью, так и по объему моделирования, также представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты осреднения горизонтальной скорости и перехода к динамической скорости переноса пылевой массы на высоте +10 м над поверхностью пыления, полученные с помощью модели аэродинамических параметров

Скорость ветра U_{10} , м/с	Осредненная скорость u_{10} , м/с	Динамическая скорость u_* , м/с	Осредненные коэффициенты диффузии Γ_t , м ² /с	
			на высоте +10 м	по объему
5	6,439	0,4983	35,7	75,5
8	10,305	0,7974	57,1	121,5
11	14,172	1,0967	78,5	166,0
14	18,040	1,3960	99,9	211,6
17	21,908	1,6953	121,3	257,2
20	25,776	1,9946	142,8	302,7
23	29,791	2,3053	156,7	336,4

Выполнены обработка и анализ графической информации гранулометрического состава отвалных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2, (Стриженок, 2015). Получены количественные показатели по доле и «весу» интервала каждого промоделированного размерного класса пылевых частиц, необходимые для выполнения численных экспериментов по турбулентному переносу мультidisперсной примеси (табл. 3).

Таблица 3

Показатели пыления частиц разных размерных классов

Диаметр, мкм	0–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70
Доля, % вес.	0,811	3,176	5,41	7,40	7,99	7,2	6,15
«Вес» интервала	0,022	0,083	0,142	0,194	0,209	0,189	0,161

В течение 2017 года по отработанному ранее алгоритму для каждого размерного диапазона пыли была рассчитана интенсивность пыления в соответствии с рассматриваемыми скоростями ветра для схемы DEAD и зависимости Westphal. Расчетные интенсивности пыления, выполненные для схемы DEAD, при референтной скорости ветра 5 м/с для самой мелкой пыли (срединный диаметр 5 мкм) оказались нулевыми. Этот факт объясняется тем, что величина пороговой скорости для столь мелкой пыли выше значения динамической скорости. Для значений интенсивности пыления, предложенных D. L. Westphal с соавт. (1988), выполнено численное моделирование по турбулентному переносу мультidisперсной пыли для семи значений референтной скорости ветра U_{10} и двух значений осредненных коэффициентов диффузии (см. табл. 2).

В качестве источника пыления задавали общую площадь пляжа хвостохранилища, но при анализе результатов (в терминах концентрации пыли) в расчеты вводили корректирующий коэффициент, учитывающий только площадь пыления. Согласно отчету ЗАО «Механобр Инжиниринг», подготовленному к проекту реконструкции хвостохранилища до предельной высотной отметки 200 м, по результатам натурных наблюдений в 2006–2008 гг. площадь пыления хвостохранилища составляла от 8,2 до 10,9 га. В условиях существующей неопределенности в задании конкретных участков пыления на поверхности пляжа, применение корректирующего коэффициента вполне обосновано, т.к. процент пылящей поверхности логично задавать от всей площади пляжа хвостохранилища.

Анализ результатов расчетов показал слабое влияние выбранных значений коэффициента турбулентной диффузии на величину концентрации пыли. В нашем случае значения осредненных коэффициентов диффузии на высоте +10 м пылящей поверхности и по объему области моделирования отличались более чем в два раза, а снижение уровня концентрации пыли составило менее 1%.

Также были проанализированы поинтервальные и суммарные значения концентрации пыли в точке модели, которая соответствует центру г. Апатиты на высоте +2 м от поверхности. На этом шаге с учетом известных значений отношений интенсивности пыления для схемы DEAD и зависимости Westphal получены соответствующие значения концентрации пыли для схемы DEAD, и суммарной концентрации пыли в обсуждаемой точке (+2 м центра г. Апатиты) для указанных подходов описания процесса пыления в зависимости от референтной скорости ветра U_{10} на высоте +10 м от основания модели (рис. 10).

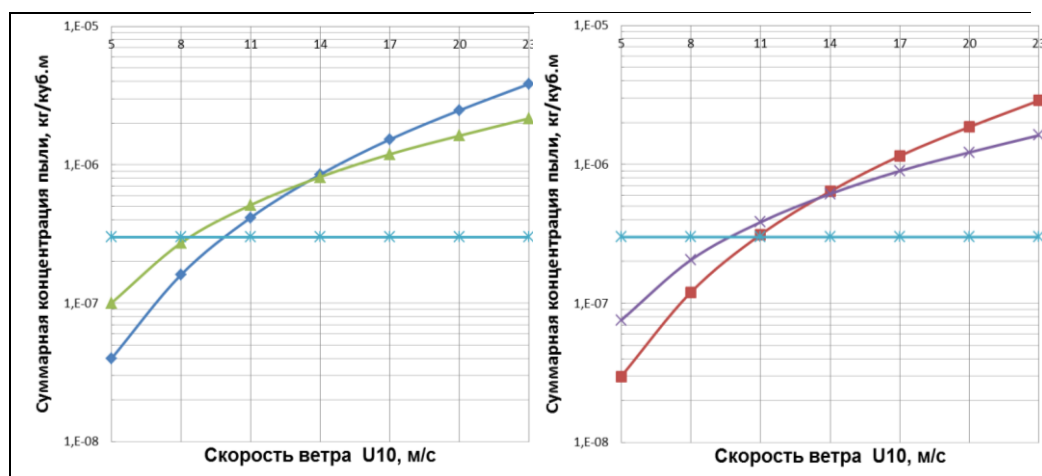


Рис. 10. Расчетные значения суммарной концентрации пыли в зависимости от скорости ветрового потока на референтной высоте для площади пылящей поверхности 10,9 га (слева) и 8,2 га (справа)

На каждом графике приведена кривая, соответствующая значению ПДК по пыли, согласно действующим гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» (Гигиенические ..., 2003). В частности,

для неорганической пыли, содержащей двуокись кремния в количестве 20–70%, максимальная разовая концентрация составляет 0,3 мг/м³ или 3·10⁻⁷ кг/м³.

Анализ представленных кривых свидетельствует о достаточной объективности прогнозных оценок. Очевидно, что увеличение площади пыления будет приводить к росту загрязнения атмосферы, что и показано на графиках. При скоростях ветра менее 8 м/с превышение порогового уровня загрязнения не прогнозируется, однако рост скорости сверх этого значения будет приводить к увеличению концентрации пыли и постепенному превышению значения ПДК; при штормовых ветрах это превышение будет значительным. Согласно отчету ЗАО «Механобр Инжиниринг», значения скорости ветра, превышающие 8 м/с, редки (вероятность превышения менее 5 %), но возможны. Следовательно, мероприятия по снижению площади пыления, проводимые экологическими службами АО «Апатит» на хвостохранилище АНОФ-2, необходимы. Исходя из выполненных оценок, можно прогнозировать, что снижение площади пыления на пляже хвостохранилища до 1 га обеспечит нормативную чистоту атмосферы г. Апатиты даже при штормовом северо-западном ветре, достигающем 20–23 м/с.

Для района Старых Апатитов требуется более точная модель рельефа местности. Однако, даже достаточно грубая в этом плане имеющаяся модель, учитывающая предгорья Хибин и наиболее крупные возвышенности (г. Щучья, Воробьиная), дает качественно верную картину распределения концентрации пыли: именно Старые Апатиты подвергаются максимальному загрязнению со стороны хвостохранилища при сильном северо-западном ветре, что неоднократно подтверждалось санитарными службами Мурманской области.

В заключение отметим, что исследования по проблеме численного моделирования процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 были отмечены в докладе Генеральной Ассамблеи ООН в 2016 году. В частности, в отчете «Global assessment of sand and dust storms» пыление от техногенных песчаных поверхностей (хвостохранилищ и пр.) названо одной из актуальных современных проблем атмосферного загрязнения населенных пунктов.

Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания ИППЭС КНЦ РАН, тема «Моделирование природных и техногенно-измененных экосистем в условиях Арктики», № гос. рег.: 114110570119.

Литература

Амосов П. В., Бакланов А. А. Использование компьютерных моделей для исследования процессов пыления хвостохранилища // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Ч. 2. Апатиты: КНЦ РАН. 2012а. С. 7–11.

Амосов П. В., Бакланов А. А. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-25: Сб. трудов XXV Междунар. науч. конф. В 10 т. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, Харьков: Национ. техн. ун-т «ХПИ». 2012б. Т. 2. С. 140–143.

Амосов П. В., Бакланов А. А. К вопросу оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: Сб. трудов XXVIII междунар. науч. конф. В 12 т. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т. 2015а. Т. 1. С. 3–5.

Амосов П. В., Бакланов А. А. Оценка вертикального потока массы пыли на хвостохранилище на базе схемы DEAD // Проблемы недропользования. 2015б. № 3. С. 80–85.

Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ. LAP LAMBERT Academic Publishing (Германия). 2014. 109 с.

Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФАН СССР. 1988. 200 с.

Гаррелс Р. М., Крайст И. П. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир. 1968. 368 с.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М., Минздрав России. 2003. Электронный ресурс: ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/42/42030. Дата обращения: 12.11.2016.

Гудков А. В., Мазухина С. И., Иванов С. В. Геохимическая оценка подземных вод Хибинского массива // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды IV Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ИВП РАН. 2015. С. 360–362.

Гурский Ю. Н. Геохимия литогидросферы внутренних морей. Т. 1. Методы изучения и процессы формирования химического состава иловых вод в отложениях Черного, Азовского, Каспийского, Белого, Балтийского морей. М.: ГЕОС. 2003. 332 с.

Иванов М. В. Оптимальные методы оценки органической нагрузки от марикультуры в условиях Белого моря // Экологические исследования беломорских организмов. Материалы 2-й международной конференции. СПб.: ЗИН РАН. 2007. С. 46–47.

Калинников В. Т., Мазухина С. И., Маслобоев В. А., Чудненко К. В., Максимова В. В. Особенности взаимодействия «нефть-вода» в морских и пресных водах // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 449. № 5. С. 535–538.

Калинников В. Т., Мазухина С. И., Маслобоев В. А., Чудненко К. В., Максимова В. В. Физико-химические факторы некондиционности химического состава природных вод Хибинского массива // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458. №5. С. 551–554.

Корнеев О. Ю., Рыбалко А. Е. Федорова Н. К. Осуществление Государственного мониторинга состояния геологической среды прибрежно-шельфовой зоны Баренцева, Белого и Балтийского морей / Окончательный отчет по Государственному контракту. Фонды Севморгео. 2012. С. 53–63.

Кухаренко А. А., Ильинский Г. А., Иванова Т. Н., Галахов А. В., Козырева Л. В., Гельман Е. М., Борнеман-Старынкевич И. Д., Столярова И. Н., Скрижинская В. И., Рыжова Р. И., Мелентьев Б. Н. Кларки Хибинского щелочного массива // Записки Российского минералогического общества. 1968. Ч. 97. Вып. 2. С.133–149.

Мазухина С. И. Формирование поверхностных и подземных вод Хибинского горного массива. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. 173 с.

Мазухина С. И., Маслобоев В. А., Чудненко К. В., Бычинский В. А., Светлов А. В. Условия формирования природных поверхностных и подземных вод Кольского Севера (на примере Хибинского массива) // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т. 13. № 4-1. С. 816–825.

Мазухина С. И., Сандимиров С. С. Применение физико-химического моделирования для решения экологических задач Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 106 с.

Мартынов В. Г. Атлантический лосось *Salmo salar* L. на северо-востоке ареала (структура популяций, экология, хозяйственное значение). Дисс. докт. биол. наук. Сыктывкар, 2005. 503 с.

Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Влияние скорости ветрового потока и высоты хвостохранилища на уровень загрязнения атмосферы // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016в. № 3. С. 67–73.

Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Результаты моделирования процессов пыления хвостохранилищ // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016г. №1 (24). С. 59–68.

Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2016а. Т. 19. № 1/1. С. 13–19.

Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Эффект скорости ветрового потока на интенсивность пыления хвостохранилища // Успехи современного естествознания. 2016б. № 3. С. 177–182.

Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Амосов П. В. Компьютерное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Вестник КНЦ РАН. 2013. № 3. С. 44–50.

Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Ригина О. Ю., Амосов П. В. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 2. С. 376–384.

Рыбчак Н. В. Ликвидация чрезвычайной ситуации на ЗАО «Беломорская нефтебаза» // Космические технологии для освоения, изучения, сохранения Арктики. 2011. Вып. 10. С. 80–83.

Справка о качестве поверхностных вод суши и морских вод на территории деятельности ГУ «Мурманское УГМС» за 2007 год (Мурманская область, Кандалакшский район). Мурманск: Центр мониторинга окружающей среды. 2008. 19 с.

Стриженок А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: Дис. ... канд. техн. наук. СПб. 2015. 184 с. Электронный ресурс: www.spmi.ru/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/dissertaciya_strizhenok.pdf. Дата обращения: 12.09.2015.

Химия морей и океанов. М: Наука. 1995, 415 с.

Швец В. М. Органические вещества подземных вод как нефтепоисковые показатели // Органические вещества и микрофлора подземных вод и их нефтепоисковое значение: Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инж. Геологии. М.: ВСЕГИНГЕО. 1970. Вып. 26. С. 6–29. Режим доступа: <http://hydropetroleum.ru/node/48>. Дата обращения: 25.04.2017.

Эрих В. Н. Химия нефти и газа. Л.: Химия. 1969. 284 с.

Amosov P. V., Baklanov A. A. Dust Storms: on importance of tailing dump height // CRETE-2012: Proceedings of the 3-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management. Chania: Executive Summaries. Technical University of Crete. 2012. P. 123–124. [Электронный ресурс]. CD: [Crete2012e-Proceedings/data/pdf-files/S10.5.pdf](http://www.crete2012e-proceedings.com/data/pdf-files/S10.5.pdf).

Amosov P. V., Baklanov A. A. Assessment of dusting intensity on ANOF-2 tailing by using a Westphal D.L. dependency // X International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development. Proceedings. Bor: Tercija. 2015. P. 39–43.

Amosov P. V., Baklanov A. A., Masloboev V. A., Mazihkina S. I. CFD-model developing of dust transfer at a tailings dump // CRETE-2014: Proceedings of the 4-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management. Executive Summaries. Chania: Technical University of Crete. 2014. P. 279–280.

Baklanov A., Rigina O. Environmental modeling of dusting from the mining and concentration sites in the Kola Peninsula, Northwest Russia // The XI World Clear Air and Environment Congress, IUAPPA-NACA. Durban, 1998. Vol. 1. 4F-3. P. 1–18.

Marticoarena B., Bergametti G. Modeling the Atmospheric Dust. Cycle 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme // Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 1995. Vol. 100. № D8. P. 16415–16430.

Mazukhina S., Masloboev V., Chudnenko K., Bychinsky V., Svetlov A., Muravyev S. Monitoring and physical-chemical modeling of conditions of natural surface and underground waters forming in the Kola North // Journal of Environmental Science and Health. 2012. Part A. Vol. 47. Is. 05. P. 657–668.

Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust // Journal of the Atmospheric Sciences. 1988. № 45. P. 2145–2175.

Сведения об авторе

Мазухина Светлана Ивановна,

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты, Апатиты; simazukhina@mail.ru

Mazukhina Svetlana Ivanovna,

PhD (Chemistry), Senior Researcher, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; simazukhina@mail.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.179-186

УДК 582

**Е. А. Боровичёв¹, Д. Б. Денисов¹, М. В. Корнейкова¹, Л. Г. Исаева¹,
А. В. Разумовская¹, Ю. Р. Химич¹, А. В. Мелехин², А. Л. Косова¹**

¹Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,

²Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

ГЕРБАРИЙ ИППЭС КНЦ РАН

Аннотация

Гербарий ИППЭС КНЦ РАН организован в 1999 году на основе сборов афиллофоровых грибов, выполненных в период исследований наземных экосистем Мурманской области. В настоящее время гербарий состоит из основной коллекции (грибы — 1850 образцов; лишайники — 820; мохообразные — 1730; сосудистые растения — 1850) и двух специализированных коллекций, присоединенных в 2012 году, — «Микроорганизмы Кольского полуострова» (57 штаммов бактерий, 305 штаммов

водорослей и цианопрокариот, 430 штаммов микроскопических грибов) и «Диатомовые водоросли Евро-Арктического региона» (3700 образцов створок диатомей в постоянных препаратах и порошкообразном материале). Сведения об образцах доступны в информационной системе Cryptogamic Russian Informations System, CRIS (<http://kpabg.ru/cris>).

Ключевые слова:

гербарные коллекции, ИС CRIS, растения, лишайники, макромицеты, микромицеты, диатомовые водоросли, микроводоросли, цианобактерии, бактерии, Мурманская область.

**E. A. Borovichev, D. B. Denisov, M. V. Korneykova, L. G. Isaeva,
A. V. Razumovskaya, Yu. R. Khimich, A. V. Melechin, A. L. Kosova**

HERBARIUM OF INEP KSC RAS

Abstract

Herbarium of INEP KSC RAS was founded in 1999, with the first collection of aphylophoroid fungi specimens resulted from monitoring studies of terrestrial ecosystems in the Murmansk Region. Now, the Herbarium consists of the main collection (including 1850 samples of fungi, 820 – of lichens, 1730 – of bryophytes, and 1850 – of vascular plants) and two specialized collections, «Microorganisms of the Kola Peninsula» (57 bacterial strains, 305 strains of algae and cyanoprokaryota and 430 microscopic fungi strains) and «Diatom algae of Euro-Arctic Region» (700 samples of diatom slides and purified diatoms shells powder). Information on the herbarium samples is available in the information system Cryptogamic Russian Informations System, CRIS (<http://kpabg.ru/cris/>).

Keywords:

herbarium collections, IS CRIS, plants, lichens, macromycetes, micromycetes, diatom algae, microalgae, cyanoprokaryota, bacteria, Murmansk region.

Введение

Сохранение биоразнообразия является насущной экологической проблемой современности. Один из наиболее эффективных подходов к решению этой проблемы — это создание различных биологических коллекций, в том числе гербариев. Современный гербарий — это не собрание пыльных музейных экспонатов, складированных в запасниках, а важнейший элемент сохранения генетических ресурсов, документирующий факт произрастания вида на определенной территории.

Гербарий ИППЭС КНЦ РАН организован в 1999 году в результате объединения разрозненных сборов афиллофоровых грибов, собранных в лесах Мурманской области. Позднее он начал пополняться, благодаря плановым работам по инвентаризации разнообразия биоты региона. Значимым вкладом стали ежегодные поступления образцов грибов с территории заповедников Лапландский и «Пасвик». В последние годы коллекции пополняются сборами грибов, лишайников, мохообразных и сосудистых растений на существующих и проектируемых особо охраняемых природных территориях (ООПТ). В 2012 году к Гербарию были присоединены две специализированные коллекции — «Музей бактерий и микроскопических грибов и водорослей Кольского полуострова» и «Коллекция диатомовых водорослей Евро-Арктического региона» (Боровчиев, Исаева, 2015). В тот же период Гербарий был зарегистрирован в международной системе Index Herbariorum с акронимом INEP (http://sweetgum.nybg.org/science/ih/herbarium_details.php?irn=173572). В 2017

году Гербарий прошел регистрацию в качестве уникальной научной установки на сайте «Современная исследовательская инфраструктура Российской Федерации» (регистрационный номер 498838) (<http://www.ckp-rf.ru/usu/498838/>). Официальная страница Гербария на сайте ИППЭС: <http://inep.ksc.ru/index.php/2018-04-05-20-23-24/2018-04-10-15-43-16>.

Важнейшими задачами Гербария ИППЭС КНЦ РАН являются сохранение, поддержание и развитие коллекционного фонда для документального подтверждения разнообразия растений, лишайников и грибов Мурманской области и сопредельных территорий, а также создание легкодоступной базы для инвентаризации и рационального использования растительных ресурсов и многолетнего мониторинга окружающей среды. Гербарий имеет и важное образовательное и научно-просветительское значение.

Гербарные коллекции активно используются при выполнении плановых и хозяйственных работ в Лаборатории наземных экосистем, Лаборатории водных экосистем и Лаборатории экологии микроорганизмов. Краткие обзоры этих исследований представлены в отдельных статьях настоящего сборника.

Гербарные образцы — это уникальные документы, фиксирующие факт произрастания или наличия биологического вида на данной территории в определенный период времени. Значимость коллекций Гербария ИППЭС КНЦ РАН определяется высокой ценностью актуальной информации о видовом составе различных групп организмов. Так, коллекция постоянных препаратов (слайдов) и образцов диатомей используется для палеоэкологических исследований, позволяющих реконструировать условия формирования осадков и темпы осадконакопления. К их числу относятся позднеплейстоценовые межледниковые диатомовые комплексы, голоценовые комплексы диатомей из осадков морских террас на побережье Баренцева и Белого морей.

Гербарные образцы активно привлекаются для таксономических обработок отдельных таксонов грибов (Volobuev et al., 2015; Zmitrovich et al., 2015) и печеночников. Чистые культуры из коллекции микроорганизмов используются в молекулярно-генетических исследованиях. В частности, из почвы, загрязненной тяжелыми металлами в 5 км от медно-никелевого комбината «Печенганикель» выделен и намечен к описанию новый вид сине-зеленых водорослей *Stenomitos edaphicum* Shalygina, Redkina et Johansen sp. nov. (Шалыгина и др., 2017). Описано новое для науки монотипное семейство цианобактерий Cyanomargaritaceae, включающее два новых для науки криптических вида: *Cyanomargarita melechinii* Shalygin, Shalygina et Johansen и *C. calcarea* Shalygin, Shalygina et Bohunicka (Shalygin et al., 2017).

С целью интенсификации микологических исследований в регионе, облегчения доступа к образцам Гербария INEP и как можно более широкого вовлечения их в научный оборот, основана серия «Эксикаты грибов Мурманской области (Северо-Запад России)». К настоящему времени изданы два выпуска «Эксикатов» по 15 видов в каждом (Химич и др., 2016; Химич, Боровичев, 2017). В первый выпуск вошли: *Amylostereum chailletii* (Pers.) Boidin, *Asterodon ferruginosus* Pat., *Ceraceomyces serpens* (Tode) Ginns, *Ceriporus mollis* (Sommerf.) Zmitr. et Kovalenko, *Ceriporiopsis mucida* (Pers.) Gilb. et Ryvarden, *Clavaria fragilis* Holmsk., *Laurilia sulcata* (Burt) Pouzar, *Laxitextum bicolor* (Pers.) Lentz, *Ramariopsis subtilis* (Pers.) R. H. Petersen, *Oxyporus populinus* (Schumach.) Donk, *Phellinus laevigatus* (P. Karst.) Bourdot et Galzin, *Sistotrema confluens* Pers., *Skeletocutis stellae*

(Pilát) Jean Keller, *Veluticeps abietina* (Pers.) Hjortstam et Tellería, *Xanthoporus syringae* (Parmasto) Audet; во второй – *Antrodiella pallasii* Renvall, Johann. et Stenlid, *Aphanobasidium pseudotsugae* (Burt) Boidin et Gilles, *Craterellus cornucopioides* (L.) Pers., *Craterellus lutescens* (Fr.) Fr., *Gloeoporus taxicola* (Pers.) Gilb. et Ryvardeen, *Hydnellum caeruleum* (Hornem.) P. Karst., *Hydnellum conrescens* (Pers.) Banker, *Hydnellum ferrugineum* (Fr.) P. Karst., *Hydnellum peckii* Banker, *Odontidium romellii* (S. Lundell) Parmasto, *Phellodon tomentosus* (L.) Banker, *Phellopilus nigrolimitatus* (Romell) Niemelä, T. Wagner et M. Fisch., *Phlebia centrifuga* P. Karst., *Sistotremastrum suecicum* Litsch. ex J. Erikss., *Xylodon asperus* (Fr.) Hjortstam et Ryvardeen. В этикетке для каждого образца указаны: название вида, сведения о местообитании и местонахождении, координаты, дата сбора, фамилия коллектора, фамилия определившего образец, гербарный номер.

Структура гербария

В настоящее время Гербарий состоит из трех отделов: 1) основной гербарий, содержащий образцы сосудистых растений, грибов, мохообразных и лишайников; 2) коллекция микроорганизмов Кольского полуострова; 3) коллекция диатомовых водорослей Евро-Арктического региона.

Основной гербарий

Коллекция грибов создана в 1999 году и содержит 1850 образцов. Это крупнейшая коллекция грибов с территории Мурманской области (1450 образцов), не имеющая аналогов. Также на хранении находятся образцы из других регионов: Архангельской, Вологодской, Ленинградской, Московской, Калужской областей, Краснодарского края, Финляндии, Украины, республик Карелия, Коми, Бурятия и Татарстан.

Коллекция лишайников организована в 2012 году и насчитывает 820 образцов. Основу коллекции составляют лишайники, собранные в результате мониторинговых и инвентаризационных работ на территории Мурманской области, в том числе, крупнейшая коллекция лишайников с территории заповедника «Пасвик».

Коллекция мохообразных создана в 2012 году и насчитывает 1730 образцов, собранных в результате инвентаризационных работ на территории заповедников (Лапландский, Кандалакшский, «Пасвик»), планируемых ООПТ (заказники регионального значения «Болота у озера Алла-Акаярви» и «Пазовский»), а также в других регионах России. В первую очередь, это коллекции маршанциевых печеночников из Дальневосточных районов России: Приморского и Хабаровского краев, Сахалинской, Амурской, Магаданской областей, а также Ярославской и Вологодской областей, республик Татарстан, Карелия и др.

Коллекция сосудистых растений организована в 2012 году и насчитывает 1850 образцов, собранных преимущественно в Мурманской области. Наиболее значительны коллекции из Лапландского заповедника, районов Баренцевоморского побережья – полуостровов Рыбачий и Средний, Ивановской губы (Восточный Мурман), низовий реки Поной, а также коллекция макрофитов озера Имандра.

Коллекция микроорганизмов Кольского полуострова

Коллекция организована в 1985 году и насчитывает 57 штаммов бактерий, 430 штаммов микроскопических грибов и 305 штаммов микроводорослей и цианобактерий. Бактерии и микроскопические грибы выделены из чистых природных сред Мурманской области, включая полуострова Кольский и Рыбачий; из почвенной и воздушной сред, загрязненных нефтепродуктами, выбросами Кандалакшского алюминиевого завода и медно-никелевых предприятий «Североникель» и «Печенганикель»; из антропогенно-измененных сред (апатит-нефелиновая руда, нефелиновые пески, оборотная вода и др.).

Чистые культуры водорослей и цианобактерий получены преимущественно из почвенных образцов, отобранных в заповеднике «Пасвик», на полуострове Рыбачий (подбуры, криогенные, примитивные, подзолистые, торфяные и болотные почвы), в зонах антропогенного влияния, где основными загрязняющими веществами являются тяжелые металлы (комбинат «Печенганикель»), соединения фтора (Кандалакшский алюминиевый завод) и нефтепродукты (гора Каскама).

Коллекция диатомовых водорослей Евро-Арктического региона

Коллекция основана в 1993 году и содержит 3700 единиц хранения, включающих постоянные (слайды) и порошковые препараты. В состав коллекции входят образцы за период исследований с 1963 по 2018 гг.

Коллекция представлена диатомовыми комплексами перифитона, планктона и донных отложений древних и современных водоемов. Это водоемы Мурманской области (бассейны озера Имандра, озерно-речной системы реки Паз, Поной, Пана, Варзуга, Стрельна, Йоконьга, озера и реки Хибинского горного массива и Чуна-гундры), Архангельской области (бассейн реки Печора, озера и реки Новой Земли), Ненецкого автономного округа, архипелага Шпицберген и арктических морей — Баренцевого, Норвежского, Гренландского, моря Лаптевых. Значительная часть образцов легла в основу уникальной аннотированной коллекции диатомовых водорослей, включающей описания древних и современных морских и пресноводных диатомей (Каган, Денисов, 2002, 2011; Каган, 2012).

Гербарий и информационные системы

Важное направление развития ботанических исследований в Мурманской области — обеспечение сохранности, доступности и возможности эффективного использования информации о разнообразии растений, грибов, лишайников и микроорганизмов.

В 2010 году на основе программного комплекса системы управлениями баз данных (СУБД) MS Access была создана локальная база данных по водорослям Евро-Арктического региона (БД ВЕАР). Ее основу составляют материалы по диатомовым водорослям, включая комплексы донных отложений и современные сообщества, а также информация о других группах водорослей (зеленые, красные, золотистые и др.) и цианопрокариот (Денисов, Косова, 2017). Весь массив данных, насчитывающий 12997 записей, в апреле 2018 года конвертирован в ИС CRIS.

В 2015 году в рамках совместного с ПАБСИ КНЦ РАН проекта по развитию открытой информационной системы CRIS по разнообразию криптогамной биоты России был разработан раздел по грибам. Информационная система CRIS

(<http://kpabg.ru/cris/>) была создана в качестве инструмента для внесения, хранения, организации, поиска и вывода первичных данных по биоразнообразию и обеспечения свободного и удобного доступа к ним (Мелехин и др., 2013; Давыдов и др., 2017). CRIS позволяет интегрировать все виды данных о биоразнообразии: материалы гербариев, коллекций, наблюдений, литературные данные, информацию о ДНК-последовательностях, фотографии видов, связанные с конкретными образцами. В настоящее время в CRIS работают и успешно пополняются разделы по отдельным коллекциям Гербария ИППЭС КНЦ РАН: «Грибы» <http://www.kpabg.ru/f/>, «Мхи» <http://kpabg.ru/m/>, «Печеночники» <http://kpabg.ru/h/>, «Сосудистые растения» <http://kpabg.ru/v/>, «Водоросли» <http://kpabg.ru/d/>, «Микроорганизмы» <http://kpabg.ru/b/>.

Дальнейшее развитие информационной системы связано с необходимостью интеграции дополнительной информации, расширяющей возможности системного анализа данных. Так, раздел по водорослям планируется дополнить гидрохимическими данными и результатами анализа содержания химических элементов в донных отложениях. Важной задачей на ближайшую перспективу является экспорт данных Гербария INEP в Глобальную информационную систему по биоразнообразию – Global Biodiversity Information Facility, GBIF (gbif.org).

Исследования выполнены в рамках государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН (АААА-А18-118021490070-5, 114110570120, АААА-А18-118021490073-6).

Литература

Боровичев Е. А., Исаева Л. Г. Гербарий Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН // Ботанические коллекции — национальное достояние России: сборник научных статей Всероссийской с международным участием научной конференции, посвященной 120-летию Гербария имени И. И. Спрыгина и 100-летию Русского ботанического общества (Пенза, 17–19 февраля 2015). / под ред. д-ра биол. наук, проф. Л. А. Новиковой. Пенза: ПГУ. 2015. С. 339–340.

Давыдов Д. А., Мелехин А. В., Константинова Н. А., Боровичев Е. А. Ресурсы и потенциал Cryptogamic Russian Information System // Использование современных информационных технологий в ботанических исследованиях: Материалы Международной научно-практической конференции. Апатиты: КАЭМ. 2017. С. 34–36.

Денисов Д. Б., Косова А. Л. Разработка базы данных по водорослям Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. Сер. Прикладная экология Севера. 2017. Вып. 5. С. 45–52.

Каган Л. Я. Диатомовые водоросли Евро-Арктического региона: аннотированная коллекция (древние и современные морские и пресноводные) / Ред.: Д. Б. Денисов, Н. А. Кашулин. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. 209 с.

Каган Л. Я., Денисов Д. Б. Исследования диатомей на Кольском полуострове в XX веке // Морфология, экология и биогеография диатомовых водорослей: Материалы VIII школы диатомологов России и стран СНГ / Ред. С. И. Генкал. Борок: Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. 2002. С. 38–39.

Каган Л. Я., Денисов Д. Б. Коллекция диатомовых водорослей Евро-Арктического региона // Материалы XII международной научной конференции диатомологов, посвященной 120-летию со дня рождения А. И. Прошкиной-Лавренко. М.: Университетская книга. 2011. С. 36–38.

Мелехин А. В., Давыдов Д. А., Шалыгин С. С., Боровичев Е. А. Общедоступная информационная система по биоразнообразию цианопрокариот и лишайников CRIS (Cryptogamic Russian Information System) // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 2013. Т. 118. Вып. 6. С. 51–56.

Химич Ю. Р., Боровичев Е. А., Исаева Л. Г. Эксикаты грибов Мурманской области (Северо-запад России). Выпуск 1. Апатиты: К&М. 2016. 15 с.

Химич Ю. Р., Боровичев Е. А. Эксикаты грибов Мурманской области (Северо-запад России). Выпуск 2. Апатиты: К&М. 2017. 17 с.

Шалыгина Р. Р., Шалыгин С. С., Редькина В. В. *Stenomitos edaphicum* sp. nov., новая почвенная цианобактерия // Актуальные аспекты современной микробиологии: Материалы XII молодежной школы-конференции с международным участием. М. 2017. С. 107.

Shalygin S., Shalygina R., Johansen J., Pietrasiak N., Berrendero E., Bohunická M., Mareš J., Sheil C. A. *Cyanomargarita* gen. nov. (Nostocales, Cyanobacteria): convergent evolution resulting in a cryptic genus // Journal of Phycology. 2017. Vol. 53. P. 762–777.

Volobuev S., Okun M., Ordynets A., Spirin V. The *Phanerochaete sordida* group (Polyporales, Basidiomycota) in temperate Eurasia, with a note on *Phanerochaete pallida* // Mycological Progress. 2015. Vol. 14. P. 80.

Zmitrovich I. V., Ezhov O. N., Khimich Yu. R. *Niemelaea*, a new genus of Meruliaceae (Basidiomycota) // Agriculture and Forestry. 2015. Vol. 61 (4). P. 23–31.

Сведения об авторах:

Боровичёв Евгений Александрович,

Кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; bogovichyok@mail.ru

Денисов Дмитрий Борисович,

Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией Водных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; proffessuir@gmail.com

Корнейкова Мария Владимировна,

Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией Экологии микроорганизмов Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; korneuykova.maria@mail.ru

Исаева Людмила Георгиевна,

Кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией Наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты, Кировск; isaeva@iner.ksc.ru

Разумовская Анна Владимировна,

Научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; anna-lunx@mail.ru

Химич Юлия Ростиславовна,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; ukhim@inbox.ru

Мелехин Алексей Валерьевич,

Кандидат биологических наук, научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН; melihen@yandex.ru

Косова Анна Львовна

Ведущий инженер Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты; annkosova1976@yandex.ru

Borovich Eugene Alexandrovich,

PhD (Biology), Deputy Director for Science of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; borovichyok@mail.ru

Denisov Dmitry Borisovich,

PhD (Biology), Head of Water Ecosystems Laboratory, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; proffessuir@gmail.com

Korneykova Maria Vladimirovna,

PhD (Biology), Head of Microorganisms Ecology Laboratory, Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; korneykova.maria@mail.ru

Isaeva Lyudmila Georgievna,

PhD (Agriculture), Head of the Terrestrial Ecosystems Laboratory of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; isaeva@inep.ksc.ru

Razumovskaya Anna Vladimirovna,

Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; anna-lynx@mail.ru

Khimich Yulia Rostislavovna,

PhD (Biology), Researcher of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; ukhim@inbox.ru

Melekhin Aleksey Valer`evich,

PhD (Biology), Researcher of Institute of the Polar-alpine Botanical Garden-Institute of KSA RAS, Kirovsk; melihen@yandex.ru

Kosova Anna L`vovna,

Lead Engineer of Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, Apatity; annkosova1976@yandex.ru

DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.186-194

УДК 338.2+574

Е. М. Ключникова

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН
Сектор международных связей*

**МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО КАК ФАКТОР АКТУАЛИЗАЦИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Аннотация

Дан краткий обзор основных направлений и результатов международного сотрудничества ИППЭС КНЦ РАН за период 2012–2017 гг. Показана роль международных проектов в развитии междисциплинарного подхода при планировании и осуществлении экологических исследований. Представлены результаты проектов, основанных на интеграции общественно-политических и естественнонаучных подходов и направленных на разработку методов рационального природопользования в Арктической зоне.

Ключевые слова:

международное сотрудничество; экологические исследования; рациональное природопользование.

E. M. Klyuchnikova

INTERNATIONAL COOPERATION AS A FACTOR OF ACTUALIZATION OF ENVIRONMENTAL STUDIES

Abstract

The paper presents a brief overview of the main directions and results of the INEP KSC RAS international cooperation in 2012-2017. The role of international projects in the development of an interdisciplinary approach in the planning and implementation of the environmental studies is shown. The results of studies based on the integration of social-science and natural-science approaches and aimed at developing methods for managing the environment in the Arctic are presented.

Keywords:

international co-operation; environmental studies; environmental management.

Экологические проблемы не знают границ, носят глобальный характер, их решение требует взаимодействия специалистов из разных областей знания и разных стран. Поэтому ИППЭС КНЦ РАН с первых лет своего существования был вовлечен в международные проекты. Этому способствовало подписание 11 января 1993 года Киркенесской Декларации, в которой были определены рамки развития международного сотрудничества в Баренцевом Евро-Арктическом регионе (Декларация..., 1993) и подчеркивалась его важность с целью защиты уязвимой окружающей среды региона.

Важная роль международного сотрудничества для развития Арктической зоны РФ и российской науки в целом отмечена и в правительственных документах. «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации» (2016) ставит перед академическим сообществом задачу получения новых научных и научно-технических результатов, позволяющих создать технологии противодействия техногенным, биогенным, социокультурным угрозам и эффективно реагировать на современные вызовы нарастающего противостояния человека и природы. Особую актуальность приобретают исследования процессов в обществе и природе, которые могут быть использованы для развития природоподобных технологий. Стратегия требует принципиально новых подходов, предполагающих размывание дисциплинарных и отраслевых границ в исследованиях и разработках и переход на международные стандарты.

«Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации ...» (2013) нацеливает общество на комплексное социально-экономическое развитие арктических территорий, которое базируются на стыке науки и инновационных технологий, обеспечивающих экологическую безопасность. Стратегия указывает на необходимость участия научных организаций России в международных технологических и исследовательских проектах в Арктике, что позволит российской науке не выпасть из глобальной повестки.

«Стратегия экологической безопасности Российской Федерации ...» (2017) к глобальным вызовам, стоящим перед современным человечеством, относит последствия изменения климата на планете, рост потребления природных ресурсов при сокращении их запасов, ухудшение состояния окружающей среды и потерю биологического разнообразия. Исследования в направлении преодоления этих проблем являются важным аспектом деятельности ИППЭС КНЦ РАН, и в ее осуществлении Институт опирается на международное научно-техническое

сотрудничество. Крепкие связи установлены с профильными научными организациями Норвегии, Швеции, Финляндии, США и Дании. В последние годы к ним добавились контакты с учеными из Чехии, Польши, Германии, Эстонии и Швейцарии. Только за последние пять лет Институт был вовлечен в совместные проекты более чем с 20 научными организациями из 10 стран. Дополнительный импульс международное сотрудничество получило в рамках обмена гербарными образцами и развития технологий предотвращения загрязнения окружающей среды.

Наиболее тесное и плодотворное взаимодействие Институт осуществляет с коллегами из Скандинавских стран — Норвегии, Швеции и Финляндии. Совместно с Центром экономического развития, транспорта и окружающей среды Лапландии завершён проект «Трёхстороннее экологическое сотрудничество в трансграничном регионе», направленный на оценку влияния промышленного загрязнения и климатических изменений на приграничные территории. Эти сведения необходимы для принятия решений по устойчивому экономическому развитию территорий и адаптации местного населения к происходящим изменениям. В рамках этого проекта реконструировано историческое развитие малых озёр трёх стран за более чем 600-летний период. Показано периодическое снижение продукционных процессов и видового разнообразия организмов-гидробионтов на фоне изменения температурных и гидрологических условий озёр в периоды исторических похолоданий. Обоснована ведущая роль антропогенного фактора в изменении скорости и направленности сукцессионных процессов современных арктических пресноводных экосистем на фоне потепления климата в северном полушарии (Kashulin et al., 2017).

Завершён совместный с Норвежским Институтом Биоэкономики проект «Безопасность пищи и здоровья в норвежском, российском и финском приграничных районах: связь с местной промышленностью». Задачей проекта была оценка качества и безопасности потребления питьевой воды и традиционных продуктов питания для здоровья жителей густонаселённых промышленных центров, расположенных на приграничных территориях трёх стран.

Целью ещё одного завершённого совместного проекта «Устойчивая горная промышленность, местные сообщества, экологическое законодательство» было развитие сотрудничества между частным и общественным секторами для обеспечения устойчивого развития промышленных территорий путем внедрения рекомендаций по социальному лицензированию и экологическому регулированию в сферу горной промышленности. Проект был реализован исследователями Лапландского Университета (Финляндия), Технического Университета Лулео (Швеция) и Научно-исследовательского Института NORUT (Норвегия). С российской стороны, наряду с ИППЭС КНЦ РАН, в проекте участвовали специалисты Института экономических проблем им. Лузина (LUZIN) и Центра гуманитарных проблем Баренц региона КНЦ РАН.

В результате проанализированы практики регулирования и саморегулирования деятельности горнодобывающих предприятий в Мурманской области, дана оценка влияния этих практик на социальное благополучие местного населения, проанализирована концепция «Социальная лицензия на деятельность» (Social License to Operate, SLO), успешно применяемая горнодобывающими компаниями в Канаде и Австралии (Riabova, Didyk, 2015). Был сделан вывод о том, что использование концепции SLO позволяет горнодобывающим предприятиям избегать издержек, вызванных конфликтами с местным населением.

Итогом проекта стала разработка рекомендаций по получению этой лицензии горнодобывающими предприятиями Баренц-региона. Основная рекомендация предусматривала необходимость учета интересов населения еще на этапе предоставления компаниям прав на разработку участка недр. В настоящий момент этот механизм неэффективен ни в одной из стран региона Коларктик. В России для принятия решения о предоставлении в пользование участков недр федерального значения предусмотрена только процедура аукциона, не учитывающая потребности местного населения, что может приводить к возникновению конфликтов (Söderholm et al., 2015). Унифицированные мировые стандарты и рекомендации не в полной мере ориентированы на местные сообщества Арктики (Ключникова, 2016). Следовательно, необходимо научное экспертное сопровождение на этапе разработки рекомендаций по улучшению практик саморегулирования горных компаний для работы на конкретной территории. Основными стимулами для улучшения практик саморегулирования деятельности предприятий, особенно горнодобывающих, должны быть не только требования международных кредитных организаций и потребителей продукции данных предприятий или давление со стороны властей, что характерно для Российской Федерации, но и многолетние традиции, послужившие причиной формирования местных сообществ на данной территории (Nystaen-Naarala et al., 2015).

Для решения существующей проблемы ИППЭС КНЦ РАН в 2016 году принял участие в разработке национального общественного Стандарта «Экологическая безопасность Арктики», базирующегося на ключевых принципах устойчивого развития (Котельников и др., 2016). Разработка этого документа была инициирована общественной комиссией по направлению «Экология» межрегиональной общественной организации «Ассоциация полярников». Цель Стандарта — для любого предприятия, независимо от сферы его деятельности, определить четкие принципы разработки и организации собственного комплекса мер в области обеспечения экологической безопасности (Маслобоев и др., 2017). Предложено увеличивать финансирование подготовительных этапов разработки и включать в них максимально широкое прогнозирование потенциальных природоохранных конфликтов и составление эффективных сценариев их преодоления. В качестве перспективной цели следует ставить реальную оценку экологических издержек горной промышленности и включение их в стоимость конечной продукции горных компаний (Kurviogova, Masloboev et al., 2015).

Основные рекомендации по получению социальной лицензии на деятельность горнодобывающих предприятий, разработанные ИППЭС КНЦ РАН в соответствии с лучшими международными практиками и с учетом российской специфики, были использованы при подготовке заявки на конкурс проектов международной программы Коларктик с НИИ NORUT (Норвегия) и Университетом Рованиеми (Финляндия) В 2016 году этот проект был награжден дипломом как лучший проект приграничного сотрудничества России — ЕС.

В 2014–2016 гг. выполнялся международный проект «The Arctic as a Mining Frontier: Sacrifice Zones or Sustainable Development? (ARCTICFRONT)». В нем участвовали: Университет Нурланда (UIN), Исследовательский институт Нурланда (NRI), Исследовательский Институт Западной Норвегии (WNRI), Северный центр развития территорий (NORDREGIO), Институты Кольского научного центра РАН: ИППЭС и Институт экономических проблем им. Лузина (LUZIN). Проект был направлен на выявление связей между природной

ценностью ландшафтов, национальной экологической политикой и развитием горнодобывающей деятельности в отдельных районах России, Гренландии и Норвегии. Акцент был сделан на меры государственного регулирования на национальном, региональном и местном уровнях, которые могут помочь в решении экологических проблем при реализации горнопромышленных проектов, исходя из оценки экосистемных услуг. Раздел проекта, в котором участвовал ИППЭС КНЦ РАН, оценивал экологические последствия деятельности двух горнодобывающих предприятий Мурманской области — АО «Апатит» и АО «Северо-Западная фосфорная компания» (СЗФК). По результатам исследований опубликована глава «Изучение связей между развитием горнодобывающей деятельности, информационной политикой и определением ценностей территорий в выбранных районах исследования в России, Гренландии и Норвегии» в совместной монографии «Will to Drill – Mining in Arctic Communities» (2017).

«Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации» предусматривает объединение ресурсов и возможностей государства, бизнеса, науки и образования для формирования конкурентоспособного научно-технологического сектора в области разработки и внедрения передовых технологий, включая создание новых или адаптацию уже существующих технологий к арктическим условиям. Примером такого объединения стал проект «Эффективное управление энергосбережением в Баренц-регионе», нацеленный на сотрудничество в сфере повышения энергоэффективности в приграничных районах и поиск оптимальных решений в сфере управления энергоэффективностью. В проекте участвовали: Лапландский Университет прикладных исследований (Финляндия, Рованиemi), АО «Микрополис» (Финляндия, Кеми), ЗАО «Бионова» (Финляндия, Хельсинки), Муниципальный образовательный консорциум «Лапия» (Финляндия, Торнио), Коммуна Питео (Швеция), ИППЭС КНЦ РАН, Администрации городов Кандавакша и Кировск Мурманской области.

В рамках проекта были определены и опробованы механизмы создания инновационных решений при взаимодействии «тройной спирали» (бизнеса, власти и науки) в сфере повышения энергоэффективности северных муниципалитетов. Наиболее удачным результатом сотрудничества оказался План действий по повышению энергоэффективности города Кировск, разработанный компанией Бионова (бизнес) совместно с городской Администрацией (власть) при экспертной поддержке ученых КНЦ РАН и Университета прикладных наук Рованиemi (наука). План основан на опыте внедрения лучших практик и является прямым руководством по повышению энергоэффективности в различных сферах: в планировании, закупках, образовании, строительстве и ремонте, благоустройстве. Комплексный подход к проблеме помог сократить потребление энергии и повысить качество муниципальных услуг. По отзывам Администрации г. Кировск, план позволил взглянуть на проблему с новой стороны и найти возможности повышения энергоэффективности там, где их обычно не искали. Полученные данные в свою очередь используются Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН для разработки технологий повышения энергоэффективности и комплексного использования альтернативных источников энергии в Арктике.

Опрос исполнителей проекта выявил, что организация меж-секторального сотрудничества по принципу «тройной спирали» целесообразна по следующим

причинам: «бизнес и власть получают квалифицированные консультации»; «научные разработки основываются на реальных потребностях бизнеса и власти»; «повышается эффективность бизнеса и управления»; «образовательные (научные) организации начинают готовить специалистов, обладающих знаниями и умениями, востребованными на рынке труда». По мнению опрошенных, организовывать такое взаимодействие должны органы власти и компании, получившие на это право от властей. Предприниматели считают, что бизнес готов платить за новые знания (консультации, разработку технологий) при условии «заключения долгосрочных договоров и использования всех возможностей международного сотрудничества», «достижения определенного уровня развития компаний», «включения затрат в общую стоимость работ, основанных на полученных технологиях». Представитель финской компании сообщил, что они «уже покупают новые знания, чтобы расширить базу, на основе которой они разрабатывают свои услуги совместно с клиентами и партнерами». Для представителей бизнеса сотрудничество в рамках этого проекта было полезно потому, что позволило «получить новые знания в сфере технологий повышения энергоэффективности», «найти партнеров», «получить информацию о трендах муниципальной и региональной политики в сфере повышения энергоэффективности для расширения рынка услуг своих компаний». Ученым сотрудничество с бизнесом и органами местного самоуправления оказалось интересно в качестве возможности «получения актуальных данных для выбора и внедрения технологий» и «продвижения современных идей и технологий в реальный сектор». Представители органов местного самоуправления считают сотрудничество с наукой и бизнесом в сфере повышения энергоэффективности целесообразным и не находят препятствий организации такого сотрудничества в других сферах в рамках своих полномочий.

Для обеспечения более информированной, своевременной и гибкой политики и принятия решений, связанных с адаптационными действиями в быстро меняющейся среде Арктики, «Программа арктического мониторинга и оценки» организовала научно-исследовательский проект АМАП (АМАР). Над проектом работали исследователи из восьми стран: России, США, Канады, Дании, Норвегии, Исландии, Швеции и Финляндии. Они оценили состояние окружающей среды и социально-экономическую ситуацию в Арктике, перспективы адаптации населения на локальном и региональном уровнях, специально для коренных и малочисленных народов, проживающих в Арктике; проанализировали воздействие и последствия происходящих изменений; разработали сценарии развития местных сообществ в зависимости от глобальных трендов и адаптационных возможностей, основанных на концепции жизнеспособности (resilience).

Сотрудники Института приняли участие в исследованиях адаптационного потенциала и в разработке сценариев развития Баренц-региона и пришли к коллективному выводу о том, что адаптационные перспективы в этом регионе не поддаются оценке из-за отсутствия полных и достоверных данных. Различные социальные категории населения по-разному смотрят на проблемы адаптации и имеют разные возможности по осознанию, разработке и осуществлению адаптационных действий. Экономическая и политическая неопределенность, генерируемая на глобальном уровне, не позволяет принимать своевременные и верные решения со стороны переусложненной управленческой системы. Таким

образом, мы живем в условиях тотальной неопределенности (Nilsson et al., 2017a), и, поскольку для управления развитием необходимо иметь хоть какие-то ориентиры, было предложено использовать метод сценарного прогнозирования, опирающийся на знания и опыт местных сообществ, нанизанный на глобальные тенденции (Nilsson et al., 2017б).

На основе опыта, полученного в рамках работы с иностранными коллегами, были разработаны сценарии развития различных отраслей промышленности Мурманской области в условиях меняющегося климата и глобальных неопределенностей. При любых сценариях для местных предприятий особую важность приобретают: использование оптимальных технологий по переработке минерального сырья из числа доступных (в том числе биотехнологий), поиск и создание новых технологий по рациональному водопользованию и новых методов очистки воды. Это, в свою очередь, требует активации региональных ресурсов — интеллектуальных, институциональных и т. п. (Ключникова и др., 2017).

По итогам этого проекта подготовлены главы сборника АМАП (Nilsson et al., 2017б; Tenberg et al., 2017). Основная задача главы «Действия по адаптации к изменению климата в Арктике: сценарии будущего» — заложить основу для вовлечения местных и региональных участников в генерирование знаний о возможных сценариях развития Баренц-региона. В главе рассмотрены вопросы прогнозирования будущих тенденций и вызовов в основных отраслях экономики Арктики в условиях меняющегося климата и в зависимости от трендов мирового развития. Обоснована необходимость использования структурированного и согласованного с глобальными тенденциями подхода к разработке региональной и корпоративной стратегий развития. Совместно с Университетом Лапландии подготовлена глава «Местные и региональные перспективы адаптации» (Tenberg et al., 2017).

В рамках совместной Программы мониторинга природной среды в трансграничном регионе Норвегии, Финляндии и России ежегодно проводятся мероприятия ИППЭС КНЦ РАН и ряда зарубежных научно-исследовательских организацией: Акваплан-НИВА, Норвежского института водных исследований (NIVA) и Департамента окружающей среды провинции Финмарк. В 2015–2017 гг. на примере ряда водотоков России и Норвегии выполнена оценка вклада в загрязнение Баренцева моря приоритетных поллютантов (органических соединений и тяжелых металлов), поступающих с речными стоками. Оценено содержание тяжелых металлов в донных отложениях и тканях рыб в более чем 50 арктических и субарктических водоемах Норвегии, Финляндии и России. Выявлен устойчивый тренд к росту концентраций ртути в донных осадках и тканях рыб на протяжении последних десятилетий. Предложены общие для Северной Фенноскандии региональные нормативы содержания ртути в организмах рыб (Braaten et al., 2017).

В настоящее время совместно с Университетом Оулу (Финляндия), научно-исследовательским институтом НОРУТ (Норвегия) и Техническим Университетом Лулео (Швеция) инициированы исследования по повышению экономической эффективности добычи и переработки минеральных ресурсов при уменьшении негативного влияния этих видов производственной деятельности на окружающую среду.

Совместно с Университетом Тромсё (Норвегия) и финским Институтом Окружающей среды начались исследования по созданию новых технологий

биоремедиации береговых территорий, загрязненных нефтепродуктами. В основу этого проекта положены данные результаты, полученные в предыдущий программный период. В частности, были выявлены условия самовосстановления нефтезагрязненных почв высоких широт и способы активизации процессов их очищения с помощью микробиологических и агрохимических приемов; определены периоды очищения почв от нефтепродуктов различных типов (дизельное топливо, бензин, стабильный газовый конденсат, топочный мазут, отработанное машинное масло); оценено их воздействие на почвенную биоту и подобран ассортимент растений, устойчивых к нефтезагрязнению.

Многие международные проекты Института носят междисциплинарный характер и тесно сопряжены с тематикой общественных наук. Это анализ динамики соотношения глобальной и национальной составляющих в социально-экономическом развитии России, оптимизация участия страны в процессах глобальной интеграции и др. Результаты ряда проектов ориентированы на использование при разработке управленческих решений.

Обзор подготовлен в рамках государственного задания лаборатории экологии промышленного производства, № гос. рег.: АААА-А18-118021490072-9.

Литература

Декларация о сотрудничестве в Баренцевом Евро-Арктическом регионе. 1993. Режим доступа: http://www.lawrussia.ru/texts/legal_555/doc55a708x422.htm.

Ключникова Е. М. Анализ практик КСО горнодобывающих компаний в Арктических регионах РФ / Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. С. 311–317.

Ключникова Е. М., Исаева Л. Г., Маслобоев В. А. и др. Сценарии развития ключевых отраслей экономики Мурманской области в контексте глобальных изменений в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1(25). С. 19–31.

Котельников В. А., Ключникова Е. М., Кильдюшова И. А., Саркова О. М., Васильева Ж. В. Общественный национальный стандарт «Экологическая безопасность Арктики». Режим доступа: arcticas.ru/docs/2016/Broshura_Arctica.pdf. Дата обращения: 20.10.2017.

Маслобоев В. А., Ключникова Е. М., Котельников В. А. О разработке национального общественного стандарта «Экологическая безопасность в Арктике» // Эколого-экономические проблемы развития регионов и стран (устойчивое развитие, управление, природопользование). Материалы 14-й Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 108–112.

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Утверждена Указом Президента РФ № 642 от 01.12.2016. Режим доступа: rulaws.ru/president/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-01.12.2016-N-642.

Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020. Утверждена Указом Президента РФ 8.02.2013. Режим доступа: mines.gov-murman.ru/upload/iblock/b36/strategy_azrf.pdf.

Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Утверждена Указом Президента РФ № 176 от 19.04.2017 // Собрание законодательства РФ: интернет-портал правовой информации. № 17. Ст. 2546. Режим доступа: www.pravo.gov.ru. Дата публикации: 24.04.2017.

Braaten H. F., Ekerblom S., de Wit H. A., Skotte G., Rask M., Vuorenmaa J., Kahilainen K. K., Malinen T., Rognerud S., Lydersen E., Amundsen P-A., Kashulin N., Kashulina T., Terentyev P., Christensen G., Jackson-Blake L., Lund E., Rosseland B. O. ICP Waters report 132/2017 Spatial and temporal trends of mercury in freshwater fish in Fennoscandia (1965–2015). NIVA-Report 7179-2017. Oslo. 72 p.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Kashulin A. N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk region, Russia. // *Journal of Environmental Science and Health.* 2017. Part A. 52:9. P. 921–929.

Koivurova T., Masloboev V. et al. Legal Protection of Sami Traditional Livelihoods from the Adverse Impacts of Mining: A Comparison of the Level of Protection Enjoyed by Sami in Their Four Home States // *Arctic Review on Law and Politics.* 2015. Vol. 1. P. 11–51.

Nilsson A. E., Bay-Larsen I., Carlsen H., Jylhä K., Klyuchnikova E., Masloboev V., van Oort B., van der Watt L.-M. Towards extended shared socioeconomic pathways: A combined bottom-up and top-down methodology with results from the Barents region // *Global environmental changes.* 2017. Vol. 45. P. 124–132.

Nilsson A. E., Bay-Larsen I., Carlsen H., Jylhä K., van der Watt L.-M., van Oort B., Bjorkan M., Bourmistrov A., Eklund N., Isaeva L., Ivanova L., Kharitanova G., Klyuchnikova E., Masloboev V. Chapter 5. Future narratives // *AMAP 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Barents Area. Monitoring and Assessment Programme (AMAP).* Oslo, Norway, 2017. P. 109–126.

Nysten-Haarala S., Klyuchnikova E., Helenius H. Law and self-regulation—Substitutes or complements in gaining social acceptance? // *Resources Policy.* 2015. Vol. 45. P. 52–64.

Riabova L., Didyk V. Social license to operate for mining companies in the Russian Arctic: two cases in the Murmansk region. *Arctic Yearbook-2015.* Режим доступа: www.arcticyearbook.com/index.php/briefing-notes2014/120-social-license-to-operate-for-mining-companies-in-the-russian-arctic-two-cases-in-the-murmansk-region. Дата обращения: 20.10.2017.

Söderholm K., Söderholm P., Helenius H., Pettersson M., Viklund R., Masloboev V., Mingaleva T., Petrov V. Environmental regulation and competitiveness in the mining industry: Permitting processes with special focus on Finland, Sweden and Russia // *Resources Policy.* 2015. Vol. 43. P. 130–142.

Tennberg M., Dale B., Klyuchnikova E., Löf A., Masloboev V., Scheepstra A., Kietäväinen A., Naskali P. Chapter 3. Local and regional perspectives on adaptation. // *AMAP 2017. Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Barents Area. Monitoring and Assessment Programme (AMAP).* Oslo, Norway. 2017. P. 47–58.

Will to Drill – Mining in Arctic Communities / Ed.: B. Dale, I. B. Larsen, B. Skorstad et al. Springer Polar Sciences. Springer International Publishing, 2017. 128 p.

Сведения об авторе

Ключникова Елена Михайловна,

Кандидат экономических наук, заведующая международным сектором Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты; доцент кафедры геоэкологии Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета, Апатиты; kem@inep.ksc.ru

Klyuchnikova Elena Mikhailovna,

PhD (Economic), Head of International Department of the Institute of Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Centre of RAS, Apatity; associate professor of the Apatity branch of the Murmansk State Technical University, Apatity; kem@inep.ksc.ru

