

РОССИЙСКИЙ
ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

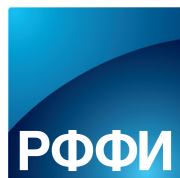
ISSN 1605-8070
eISSN 2410-4639

ВЕСТНИК РФФИ

№3-4 (115-116) июль–декабрь 2022 г.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК:
АРКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

стр.
12



Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 3-4 (115-116) июль–декабрь 2022 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

Учредитель

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»**

Главный редактор В.Я. Панченко,
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

Редакционная коллегия:

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,
В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров, В.П. Матвеев, Е.И. Моисеев,
А.С. Сигов, В.А. Ткачук, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, Д.Р. Хохлов

Редакция:

Е.Б. Дубкова, И.А. Мосичева

Адрес редакции:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru



Russian Foundation for Basic Research Journal

N 3-4 (115-116) July–December 2022

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

The Founder
Federal State Institution
“Russian Foundation for Basic Research”

Editor-in-Chief V. Panchenko,
Deputy chief editors V. Kvardakov and V. Fridlyanov

Editorial Board:

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,
V. Kandidov, P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev,
A. Sigov, V. Tkachuk, R. Petrov, I. Fedorov, D. Khokhlov

Editorial staff:

E. Dubkova, I. Mosicheva

Editorial Address:

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia
Tel.: (499) 995-16-05
e-mail: pressa@rfbr.ru

«Вестник РФФИ»

№ 3-4 (115-116) июль-декабрь 2022 года

КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока академике, профессоре С.А. Добролюбове.....	6
Аннотация тематического блока.....	8
<i>С.А. Добролюбов</i>	

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: АРКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология анализа состояния природной среды равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации	12
Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев, Т.Я. Беленович, Н.А. Неверов	
Изотопно-геохимические исследования подземных вод в Заполярном районе Ненецкого автономного округа	25
А.И. Малов	
Зоны интенсивного природопользования в российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе.	37
В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров, Е.А. Боровичев, Е.М. Ключникова, Л.Г. Исаева, Л.А. Рябова, Д.Б. Денисов, А.В. Светлов, Е.А. Красавцева, В.В. Максимова, С.И. Мазухина, Т.А. Сухарева, В.В. Еришов, Н.Е. Королева, Л.В. Иванова, А.В. Лосев	
Антропогенно индуцированные процессы в водах суши арктических регионов	54
Т.И. Моисеенко, М.М. Базова	
Современная эколого-экономическая ситуация и общественное здоровье в арктической зоне Республики Саха (Якутия)	75
Н.Г. Степанько, С.А. Лозовская, В.Г. Шведов	
Оценка воздействия опасных криогенных процессов на инженерные объекты в Арктике	87
В.И. Гребенец, Ф.Д. Юров, А.И. Кизяков, Л.И. Зотова, А.А. Маслаков, В.А. Толманов, И.Д. Стрелецкая	
Многолетние изменения водного и ионного стока Северной Двины и Печоры	103
А.Г. Георгиади, А.О. Даниленко	
Лавинная активность в России в условиях изменяющегося климата	122
А.С. Турчанинова, С.А. Сократов, Ю.Г. Селиверстов, А.Ю. Комаров	
Явление отрицательной вязкости при вытягивании синоптических вихрей океана баротропными течениями.	132
Д.А. Арутюнян	

"RFBR Journal"**№ 3-4 (115-116) July–December 2022****THEMED ISSUE EDITOR'S COLUMN**

About the Editor of the Themed Section RAS Academician Professor S.A. Dobrolyubov	7
Abstract of the Themed Section	10
<i>S.A. Dobrolyubov</i>	

THEMED SECTION: ARCTIC RESEARCH

Methodology for Analyzing the State of the Natural Environment of the Plain Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation	12
<i>Yu.G. Kutinov, Z.B. Chistova, E.V. Polyakova, A.L. Mineev, T.Ya. Belenovich, N.A. Neverov</i>	
Isotope-Geochemical Studies of Groundwater in the Zapolyarny Region of the Nenets Autonomous Okrug.	25
<i>A.I. Malov</i>	
Areas of Intensive Nature Management in the Russian Arctic under Climate Change Conditions: Natural and Social Processes in the Long Term.	37
<i>V.A. Masloboev, D.V. Makarov, E.A. Borovichev, E.M. Klyuchnikova, L.G. Isaeva, L.A. Riabova, D.B. Denisov, A.V. Svetlov, E.A. Krasavtseva, V.V. Maksimova, S.I. Mazukhina, T.A. Sukhareva, V.V. Ershov, N.E. Koroleva, L.V. Ivanova, A.V. Losev</i>	
Anthropogenically Induced Processes in the Land Waters of the Arctic Regions	54
<i>T.I. Moiseenko, M.M. Bazova</i>	
Modern Environmental-Economic Situation and Public Health in the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia)	75
<i>N.G. Stepanko, S.A. Lozovskaya, V.G. Shvedov</i>	
Assessment of Hazardous Cryogenic Processes Impact on Engineering Facilities in the Arctic	87
<i>V.I. Grebenets, F.D. Yurov, A.I. Kizyakov, L.I. Zotova, A.A. Maslakov, V.A. Tolmanov, I.D. Streletskaya</i>	
The Long-Term Changes in Water and Ions Flux of Northern Dvina and Pechora	103
<i>A.G. Georgiadi, A.O. Danilenko</i>	
Avalanche Activity in Russia in the Changing Climate	122
<i>A.S. Turchaninova, S.A. Sokratov, Yu.G. Seliverstov, A.Yu. Komarov</i>	
The Phenomenon of Negative Viscosity During the Stretching of Synoptic Ocean Eddies by Barotropic Currents	132
<i>D.A. Harutyunyan</i>	

О редакторе тематического блока академике, профессоре Сергее Анатольевиче Добролюбове



- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Декан географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ) • Заведующий кафедрой океанологии географического факультета МГУ • Председатель Ученого Совета географического факультета МГУ • Председатель Специализированного диссертационного Совета по гидрометеорологическим специальностям при МГУ • Главный редактор журнала «Вестник Московского университета. Серия 5, География» • Председатель секции Совета Программы Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ и молодых ученых • Заместитель председателя Ученого Совета и председатель Экспертного Совета Русского географического общества • Член Национального Океанографического Комитета России | <ul style="list-style-type: none"> • Dean of the Faculty of Geography of the Lomonosov Moscow State University (MSU) • Head of the Department of Oceanology, Faculty of Geography, MSU • Chairman of the Academic Council of the Faculty of Geography, MSU • Chairman of the Specialized Dissertation Council for Hydrometeorological Specialties of MSU • Editor-in-Chief of the “Bulletin of the Moscow University. Ser. 5, Geography” journal • Chairman of the Council section of the Program of the President of Russian Federation to support leading scientific schools and young scientists • Deputy Chairman of the Academic Council and Chairman of the Expert Council of the Russian Geographical Society • Member of the National Oceanographic Committee of Russia |
|--|---|

- *Chairman of the Earth Sciences Section of the Presidential Grants Council for Young Scientists*

Honours and awards

- *Medal of the Order “For Merit for the Motherland”, 1st class (2019)*
- *Medal of the Order “For Merit for the Motherland”, 2nd class (2000)*

бальном гидрологическом цикле и переносе тепла». В 1998 он получил звание профессора.

С.А. Добролюбов участвовал в более чем десяти океанских экспедициях в рамках международных программ исследования океана и климата. Сферами его научных исследований являются: глобальная циркуляция океана, пресноводный баланс, меридиональный перенос тепла, роль океана в колебаниях климата, водные массы океанов.

В 2006 г. С.А. Добролюбов был избран членом-корреспондентом РАН по специальности «Гидрометеорология». В 2022 г. избран академиком РАН по специальности «Океанология, водные ресурсы».

Hydrological Cycle and Heat Transfer". In 1998 he received the academic rank of professor.

S.A. Dobrolyubov had participated in more than ten oceanic expeditions within the framework of international ocean and climate research programs. The areas of his scientific research include: global circulation of the Ocean, freshwater balance, meridional heat transfer, the role of the Ocean in climate fluctuations, water masses of the oceans. In 2006 S.A. Dobrolyubov was elected a Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences by specialty “Hydrometeorology”. In 2022 he was elected an Academician of the Russian Academy of Sciences by specialty “Oceanology, Water Resources”.

С.А. Добролюбов

Российским фондом фундаментальных исследований, помимо поддержки многочисленных проектов по арктической тематике в рамках ежегодных конкурсов проектов фундаментальных исследований, в 2018 г. был проведен тематический конкурс «Фун-

Статья «Зоны интенсивного природопользования в российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе» (В.А. Маслобоев и др.) пред-

Abstract of the Themed Section

S.A. Dobrolyubov

The intensification of activities on the development of the Arctic zone of the Russian Federation in recent years is determined both by the geopolitical interests of Russia and by the significant mining potential of the region, which attracts leading mining companies. At the state level, the main tasks for the development of the Arctic zone and ensuring national security are defined in the "Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035", which includes "increasing activities to conduct fundamental and applied scientific research in the interests of the development of the Arctic". An important part of such research is obtaining detailed knowledge of the state and the changes in the natural environment of the region, which determines the possibility of systematic transportation along the Northern Sea Route, increasing the competitiveness of Russia in the world market, as well as the success in economic activity and its development *in situ*. The development of the Arctic regions carries high environmental and social risks, which also require detailed consideration. The undoubted potential of the Arctic region cannot be assessed without taking into account the vulnerability of the natural environment and socio-economic problems associated with the inevitable changes in the industrial infrastructure and living conditions of the local population. At the same time, changes occurring in polar latitudes can have a reverse effect on the other regions of the Earth, changing the conditions of human existence not only in high, but also in middle latitudes. Studies of the interdependence between the Arctic seas, the run-off of the Arctic rivers, the conditions for the existence of the cryosphere, which affects aquatic and terrestrial ecosystems and are "complicated" by anthropogenic impact, require comprehensive natural science research. Comprehensive studies make it possible to assess which changes should be expected in the natural complexes of the Arctic as a result of natural changes in environment and planned economic activities, and what would be the social consequences of active development of the region.

The Russian Foundation for Basic Research, in addition to supporting numerous projects on Arctic topics within the framework of annual calls for fundamental research projects, in 2018 held a thematic call "Fundamental Problems of Studying and Developing of the Russian Arctic: Natural and Social Environment". This special issue of the *Russian Foundation for Basic Research Journal* includes selected results of the results of the RFBR-funded project in such (and other) calls.

The article by Yu.G. Kutinov *et al.* "*Methodology for Analyzing the State of the Natural Environment of the Plain Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation*" presents a method of integrated geoecological zoning of the northern plains of Russia, developed with the support of the foundation, which made it possible to construct maps of geoecological zoning in a GIS environment based on geomorphometric parameters of the relief and a number of endogenous factors.

The paper "*Isotope-Geochemical Studies of Groundwater in the Zapolyarny Region of the Nenets Autonomous Okrug*" by A.I. Malov presents the results of determining the age of water in the aquifer of sandy deposits in the talik zone of the Pechora River valley. In dependence on the distance from the river, the age varies from 20–25 years to 12.9 ± 2.5 thousand years. Thus, the conditions for groundwater recharge in various parts of the aquifer were determined. Also, it was concluded that the thawing of permafrost leads to increase in carbon exchange between dissolved inorganic carbon and soil carbon dioxide.

The paper by V.A. Masloboev *et al.* "*Areas of Intensive Nature Management in the Russian Arctic under Climate Change Conditions: Natural and Social Processes in the Long Term*" presents the results of comprehensive studies in the Russian Arctic, which include conclusions on the impact of climate change and anthropogenic impact on terrestrial and aquatic ecosystems, the impact of enrichment tailings on the natural environment and the potential change in this impact under various scenarios of climate change, the correlation of the environmental problems with the climate change in the minds of the local population, and the role of rotational camps in the spread of epidemiological hazards.

The article *“Anthropogenically Induced Processes in the Land Waters of the Arctic Regions”* (by T.I. Moiseenko and M.M. Bazova) characterizes anthropogenic processes in the land waters of the Arctic basin and represents the changes they cause in the ecosystems. Justified criteria for diagnosing unfavorable processes and the required normative values of the water quality are proposed.

The paper by N.G. Stepanko *et al.* *“Modern Environmental-Economic Situation and Public Health in the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia)”* presents an analysis of the impact of environmental pollution in the Arctic zone of the Republic of Sakha on public health. The main sources of pollutants, natural factors that enhance their impact relative to the conditions in other regions, the main composition of regional pathologies are determined. An assessment of the state of regional health care is given and proposals are made to improve its effectiveness.

The article *“Assessment of the Impact of Dangerous Cryogenic Processes on Engineering Facilities in the Arctic”* (by V.I. Grebenets *et al.*) presents the results of assessing the degree of deformity of the Russian Arctic urban areas infrastructure as a result of the development of cryogenic processes, including those provoked by technogenic impact. It is estimated that in industrial centers the share of deformed engineering infrastructure varies from 20% to 80%. According to the developed methodology, which takes into account the degree of damage, the duration and frequency of processes, a hazard assessment was carried out for a dozen and half settlements in the Russian Arctic. Also, the classification of wastes according

to the degree of their influence on frozen grounds conditions was carried out.

The article by A.G. Georgiadi and A.O. Danilenko *“The Long-Term Changes in Water and Ions Flux of Northern Dvina and Pechora”* presents the result of the analysis of long-term series of water runoff and main ions data of the Northern Dvina and Pechora Rivers. The difference between the average annual and seasonal runoff in the phases of their increased and decreased level is estimated. It is shown that the ion runoff in contrast phases differs less than the water runoff, which is associated with the dependence of the ion concentration on the flow rate, which stabilizes the intensity of chemical denudation in the watersheds of these rivers.

The article by A.S. Turchaninova *et al.* *“Avalanche Activity in Russia in the Changing Climate”* presents a methodology for calculating the indicators of avalanche activity on the territory of Russia according to climatic parameters represented by climate models. As an example, the change in avalanche activity relative to its current condition is calculated for the middle and the end of the 21st century according to the MRI-CGCM3 model (RCP 8.5 scenario).

D.A. Harutyunyan in the paper *“The Phenomenon of Negative Viscosity during the Stretching of Synoptic Ocean Eddies by Barotropic Currents”* demonstrates the possibility of manifestation of negative viscosity in the water areas of the World Ocean, associated with the loss of energy of elongated vortices and the redistribution of this energy into background currents.

Obtaining the presenting results was made possible by the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the Projects: No. 18-05-60024 (Yu.G. Kutinov *et al.*), No. 20-05-00045 (A.I. Malov), No. 18-05-60142 (V.A. Masloboev *et al.*), No. 15-29-06948 and 18-05-60012 (T.I. Moiseenko and M.M. Bazova), No. 18-05-60103 (N.G. Stepanko *et al.*), No. 18-05-60080 (V.I. Grebenets *et al.*), No. 18-05-60240 (A.G. Georgiadi and A.O. Danilenko), No. 18-05-60080 and 15/2019/ RGS-RFBR (A.S. Turchaninova *et al.*), No. 09-05-07073 (D.A. Harutyunyan). The presented results are undoubtedly an important part of the activities for conducting fundamental and applied scientific research in the interests of the development of the Arctic zone of Russian Federation.

Методология анализа состояния природной среды равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации*

Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев, Т.Я. Беленович, Н.А. Неверов

Цель исследования – разработка методики комплексного геоэкологического районирования равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации на основе цифровых моделей рельефа. Для учета: а) экзогенных факторов были рассчитаны геоморфометрические параметры рельефа; б) эндогенных факторов – коэффициент дискретности и энергоемкости, плотность разломов и функция дробления земной коры. Такой комплексный подход не имеет аналогов и позволяет учесть влияние на состояние окружающей среды экзогенных и эндогенных, климатических и других природных факторов на глобальном, региональном и локальном уровнях. В результате была разработана методика комплексного геоэкологического районирования северных равнинных территорий России на основе современных цифровых моделей рельефа с использованием ГИС-технологий и созданы карты геоэкологического районирования.

Ключевые слова: арктическая зона России, цифровая модель рельефа, эндогенные и экзогенные процессы, методика геоэкологического районирования.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60024) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №122011300380-5).*

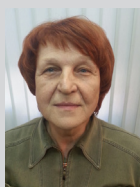
Введение

Комплексные исследования, посвященные геоэкологическому районированию крупных таксонов Земли, практически отсутствуют. Обычно районирование проводится для отдельных компонентов окружающей среды, природных и техногенных опасностей, рисков чрезвычайных ситуаций и т. п. Работы имеют разрозненный характер, отсутствуют научно-методологическая и концептуальная основы геоэкологического районирования. Комплексность изучения, реализованная в данном исследовании, основана на определении сути земной поверхности как объединяющей все компоненты этой поверхности, в совокупности составляющие природную среду. Земная поверхность рассматривалась как результат последовательного сложения геологических структур, закономерно преобразованных

комплексом экзогенных процессов и соответствующим образом проявленных в рельефе. То есть земная поверхность выступает, во-первых, как категория историческая и, во-вторых, как результат взаимодействия литосферы (эндогенных процессов) с гидросферой, атмосферой, биосферой и источниками внешнего воздействия (экзогенными или внешними процессами). Сходный подход предлагался рядом авторов для оценки интенсивности проявления современных геологических процессов и геологических опасностей освоения территории [1]. Однако в предложенной в этом исследовании методике рассматри-



КУТИНОВ
Юрий Григорьевич
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



ЧИСТОВА
Зинаида Борисовна
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



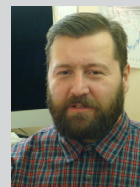
ПОЛЯКОВА
Елена Викторовна
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



МИНЕЕВ
Александр Леонидович
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



БЕЛЕНОВИЧ
Таисия Яковлевна
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН



НЕВЕРОВ
Николай Александрович
Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова
УрО РАН

ваются экзогенные и эндогенные процессы раздельно (как не связанные между собой), и не учитывает биогенные и метеофакторы. К тому же она требует равномерной сети и достаточно многочисленных данных наблюдения, что трудно соблюсти на глобальном и региональном уровнях.

Методика исследований

Для разработки методики геоэкологического районирования было необходимо выбрать репрезентативный и обширный регион. Нами была выбрана территория Архангельской области, поскольку она входит в состав Русской равнины, имеющей сходные геоморфологические параметры с Западно-Сибирской равниной [2] и Среднесибирским

плоскогорьем, занимающими более двух третей территории России (рис. 1а).

Несмотря на разное геологическое строение, все арктические и приарктические территории России относятся к единой области динамического влияния арктической зоны спрединга (рис. 1б, с) и характеризуются схожими геодинамическими режимами [3]. Архангельская область с учетом ее характеристик (площади – 2.4% общей территории России без Ненецкого автономного округа, протяженности, природных богатств, климатических особенностей и ряда других факторов) является уникальной территорией Российской Федерации [4]. Она охватывает практически все основные геолого-географические и биоклиматические типы природных комплексов от типичной тундры до типичных ландшафтов средней полосы, что позволяет проводить широкомасштабные сопоставительные исследования, результаты которых могут быть распространены на большую часть территории России.

Для проведения геоэкологических исследований нами разработан алгоритм, состоящий из трех вза-

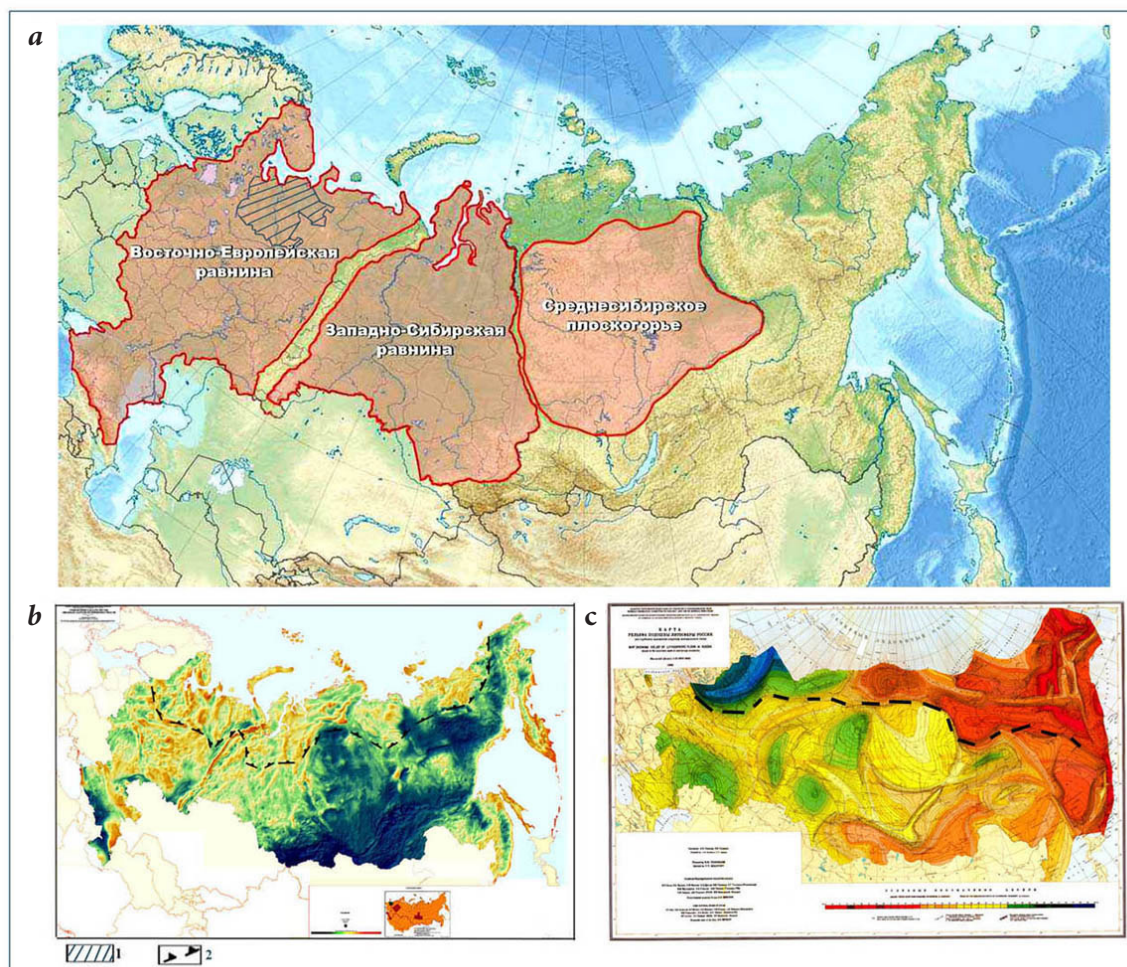


Рис. 1. Сопоставительная характеристика выбранного района исследований: а – положение равнинных территорий; б – гравиметрическая карта России; с – карта рельефа подошвы литосферы России; штриховка: 1 – площадь исследуемого региона; 2 – граница области динамического влияния зоны спрединга

имно увязанных модулей («геоморфометрического», «экзогенного» и «эндогенного»), позволяющих оценить влияние эндогенных и экзогенных процессов с учетом климатических условий (рис. 2). Для оценки предрасположенности территории к развитию экзогенных процессов основное внимание было уделено геоморфометрическому анализу, который включал в себя семь последовательно реализованных блоков, показанных на рисунке 2.

Блок №1. Выбор цифровой модели рельефа (ЦМР) для геоэкологического районирования региона базировался на таких параметрах, как геологическое и геоморфологическое строение региона, доступность, пространственное разрешение и охват территории. Кроме природных факторов, учитывались: однородность исходного материала, отсутствие артефактов и пустот (или возможность их устранения). Были проанализированы глобальные ЦМР: GTOPO30, SRTM, SRTM (3, 30), GMTED2010, ACE2, ETOPO2, ASTER GDEM(v.2) и ArcticDEM. Наиболее подходящей из существующих ЦМР для геоэкологического районирования северных территорий Российской Федерации была выбрана модель ASTER GDEM (v. 2), имеющая детальное пространственное разрешение в сочетании с точностью по высоте и однородностью материала.

Блок №2. Для сопоставления возможностей анализа рельефа был проведен сравнительный анализ модулей обработки рельефа: Spatial Analyst (ArcGIS); Vertical Mapper (MapInfo); Terrain Analysis (SAGA); SEXTANTE (gvSIG) GRASS; QGIS и др. Для задач исследования была выбрана SAGA GIS, обладающая возможностью расчета наибольшего числа геоморфометрических параметров и позволяющая

«добавлять» свои программные блоки и создавать сценарии из уже существующих.

Блок №3. Подготовка ЦМР включала следующие этапы [5]:

- 1) извлечение и объединение данных;
- 2) замену аномальных значений высотных отметок и «пустот» (авторский сценарий на языке Python);
- 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков (модуль DTM Filter); для сглаживания ЦМР был применен основанный на среднеквадратическом отклонении фильтр (модуль Simple Filter);
- 4) заполнение впадин (гидрологическая коррекция) методом L. Wang и H. Liu [6].

Далее была проведена проверка корректности полученной модели [5]. Точность построенной ЦМР проверялась сопоставлением с точками плановой съемочной сети открытых векторных данных ГИС Панорама; ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО ГИС GRASS [7]; высотными значениями топонимов и полевыми замерами высот GPS-навигатором. Установлено, что лишь 2% значений имеют расхождение свыше 20 м.

Блок №4. Теоретический анализ геоморфометрических параметров показал, что характеристики экзогенных процессов наиболее полно отражают следующие параметры: геометрические (уклон, экспозиция склона, кривизна и индекс расчлененности рельефа); гидрологические (общая и удельная водосборные площади); топографический индекс влажности; индекс мощности эрозии; индекс потенциала плоскостной эрозии; индекс баланса геомасс; опосредованно – топоклиматические (потенциальная солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация). Основные проанализи-



Рис. 2. Алгоритм геоэкологического районирования равнинных территорий арктической зоны Российской Федерации.

Таблица 1. Формулы расчета основных параметров рельефа

Параметр	Формула
Уклон поверхности	$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$
Кривизна	Горизонтальная $PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$ Вертикальная $ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2) \cdot (1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$
Водосборная площадь	$f_i = \frac{\max(0, Slope_i)}{\sum_{j=1}^s \max(0, Slope_j)}$
Индекс мощности эрозии	$SPI = A \cdot \tan(\beta)$
Индекс баланса геомасс	$MBI = \begin{cases} f(TC) \cdot (1 - f(S)) \cdot (1 - f(VDN)), & \text{для } f(TC) < 0 \\ f(TC) \cdot (1 + f(S)) \cdot (1 + f(VDN)), & \text{для } f(TC) > 0 \end{cases}$ $f(x) = \frac{x}{ x + F}$
Экспозиция склонов	$ASPECT = 180^\circ - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90^\circ \cdot \left(\frac{G}{ G }\right)$
Индекс расчлененности рельефа	$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}$
Топографический индекс влажности	$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right)$
Индекс потенциала плоскостной эрозии	$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n$
Фотосинтетически активная радиация (ФАР)	$ФАР = 0.42S + 0.60D$

зированные параметры показаны в таблице 1.

Для определения регистрируемого эффекта был проведен анализ исследуемой территории на основе упрощенной теоретической ЦМР с использованием функции (1)

$$Z = (\sin(x) \cdot \cos(y))/5 \quad (1)$$

и на тестовых участках (Онежский п-ов, Беломорско-Кулойское плато) с выборочной проверкой для всей территории области.

Учитывая большое количество геоморфологических параметров и то обстоятельство, что при их расчетах используются одни и те же высотные отметки рельефа, в результате анализа были выбраны значения углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности. На локальном уровне были проведено изучение видов кривизны и выбраны профильная (вертикальная) и плановая (горизон-

тальная) кривизна как максимально отражающие процессы эрозии, аккумуляции и транзита осадков. Также было осуществлено выделение форм рельефа по классификации Трёха [8]. Для выделения региональных закономерностей построены карты высот и геоморфометрических параметров (исходная ячейка – 1") и карты с различными окнами фильтрации: 15×15", 30×30" и 60×60". Анализ показал [5], что применение окон осреднения в целом не искажает общую картину распределения высот, но уменьшает их значения. Учитывая слабую расчлененность рельефа региона, применение метода осреднения переводит ряд процессов в более низкий ранг их опасности. Поэтому был применен кластерный анализ методом k-средних автора Forgy [9], который не искажает значения исходных данных (2).

$$\sum_{i=1}^k \int p(x) \text{dist}(c_i, x_{ij}) dx, \quad (2)$$

где $p(x)$ – функция плотности вероятности, причем если она неизвестна, то вычисляется на основе набора данных, dist – метрика близости, в данном случае используется минимальное расстояние.

Блок №5. Геоморфометрический анализ проводился по выбранным параметрам с использованием SAGA GIS. В результате был сформирован комплект

карт, готовых для дальнейших логических операций. Карты геоморфометрических параметров дают возможность оценить пространственное положение и количественные характеристики процессов эрозии и аккумуляции. В то же время нецелесообразно делать выводы о возможности проявления опасных процессов, используя значения только одного показателя. Корректнее использовать комбинации выбранных параметров, и, применив ряд логических и математических процедур, проводить вероятностное моделирование проявления экзогенных процессов. Для расчетов была использована 91 сцена глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 с разрешением 1". Обычно объединение геоморфометрических параметров проводится суммированием баллов [10]. Но в этом случае усиливается влияние взаимно коррелирующих факторов без учета их весов. Мы проводили геоэкологическое районирование территории на основе кластерного анализа выбранных геоморфометрических параметров (угла наклона, *LS*-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности). Процедура состояла из шести этапов [5]:

- 1) кластерный анализ значений угла наклона, *LS*-фактора, индекса расчлененности и влажности;
- 2) нахождение общих границ контуров, соответствующих максимальным, средним и минимальным кластерам значений параметров (эти контуры можно представить в виде множеств и вычислить их пересечение $A \cap B \cap C$, что выполнялось векторизацией растровых областей в полигоны и вычислением пересечения полигонов);
- 3) зона объединенных контуров топографического индекса влажности делилась на две части по степени увлажнения; в результате были выделены две основных области: предрасположенные к подтоплению во время паводков и склонные к заболачиванию;
- 4) с помощью кластерного анализа значений плотности бессточных впадин была выделена текущая зона [11], совпадающая с областью распространения карстующихся пород [12];
- 5) для сравнительной характеристики протекающих в каждой из выделенных зон процессов были посчитаны средние значения геоморфометрических параметров;
- 6) сопоставление карты геоэкологического районирования с геоморфологической картой региона [13].

При последующей детализации для выделения зон с максимальным развитием экзогенных процессов, с протеканием экзогенных процессов, зон аккумуляции и транзита был проведен

кластерный анализ значений углов наклона, индекса расчлененности, профильной и плановой кривизны, индекса Трёха и др.

Блок №6. Для проверки полученных результатов было проведено сопоставление карты геоэкологического районирования с почвами, ландшафтами, геологическим строением, картой четвертичных отложений, геохимией, неотектоникой, пространственным распределением карстовых процессов. Следует отметить, что выделенные зоны имеют генерализованный характер, поэтому наблюдаются некоторые перекрытия, особенно в граничных районах. Тем не менее, все природные особенности территории отражаются в выделенных зонах. Для уточнения границ использовались монофакторные карты геоморфометрических параметров.

Блок №7. Для сопоставления полученных данных с участками антропогенного прессинга и опасными природными процессами на карту геоэкологического районирования были вынесены объекты техногенного воздействия из «Схемы территориального планирования Архангельской области» (СТП) (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>). Сопоставив с картой объектов техногенного воздействия ([14], СТП), мы провели сопоставление источников антропогенного воздействия с построенными картами геоэкологического районирования и районирования по интенсивности протекания экзогенных процессов.

В модуль экзогенных факторов входили расчеты облачности, базисных поверхностей и энергии рельефа.

Облачность нами анализировалась как величина, коррелирующая с количеством выпадающих осадков и, как следствие, интенсивностью протекания экзогенных процессов. Облачный покров на материалах космической съемки характери-

зуется более высоким значением альбедо и более низкой температурой по сравнению с нижележащей поверхностью, поэтому в видимом и инфракрасном диапазонах облачный покров должен достаточно легко выделяться. Но в присутствии на земной поверхности снежного или ледового покрова выделение облачного покрова вызывает затруднения. Особенно трудно точно выделять границы облаков. Для сокращения влияния этого фактора нами обрабатывались данные только летнего периода. Для выделения облачного покрова на региональном уровне были выбраны данные MODIS на район Архангельской области. Всего было обработано 460 сцен летнего периода с 2005 по 2009 г. с использованием методики [15], которая является более точной для высоких широт, чем стандартный продукт MOD035. В ней используется классификация методом k -ближайших соседей. Подробно методика описана в работе [3]. На локальном уровне анализировались «маски облачности» по данным KA Sentinel-2; Landsat 8; Sentinel-5 2015–2020 годов. Для устранения недостатков наложения сцен использовались данные Sentinel-5P TROPOMI, так как они имеют гораздо больший охват территории и содержат данные о доли облачности в каждом пикселе. Алгоритм расчета выглядел следующим образом:

- 1) получение снимков территории за рассматриваемый период времени;
- 2) выделение канала доли облачности для каждого снимка;
- 3) совмещение всех снимков в один с вставкой в результирующие пиксели медианы (мера среднего) доли облачности.

Базисные поверхности. Для учета положения базиса эрозии, влияющего на интенсивность эрозионных процессов и обусловленного знаком и амплитудой современных подвижек земной коры, был проведен рас-

чет базисных и разностных поверхностей рельефа. Для определения порядка водотоков использовался метод Стралера [16]. Алгоритм расчета включал несколько этапов:

- 1) на основе построенной гидрологически корректной ЦМР строился грид со значениями числа Стралера с помощью модуля «Strahler Order»;
- 2) строились сети долин порядка от 1 до N , с использованием модуля «Channel Network», на вход которому поступала гидрологически корректная ЦМР и грид со значениями числа Стралера в качестве иницилирующего грида;
- 3) строились гриды базисных поверхностей с помощью модуля «Vertical Distance to Channel Network», на вход которого передавалась гидрологически корректная ЦМР и сеть долин.

По мнению [17], для равнинных территорий постоянным стоком воды характеризуются долины, начиная с четвертого порядка. Поэтому нами рассматривались долины начиная с 4-го порядка и заканчивая 10-м порядком (наивысший). На основе этой карты согласно представленному алгоритму были построены карты базисных поверхностей от 4-го до 10-го порядка. Расчет разностей базисных поверхностей выполнялся вычитанием значений соответствующих ячеек рассматриваемых поверхностей (модуль «Grid Calculator»). Участки с максимальными разностными значениями отчетливо совпадают с глубинными неоднородностями земной коры.

Потенциальная энергия рельефа. Вопрос об энергии рельефа и ее связи с энергетическими характеристиками современных процессов экзогенного рельефообразования рассматривался на протяжении практически всего XX в. [18]. Несмотря на это, оценки энергии рельефа, встречающиеся в литературе, весьма противоречивы и ненадежны [19, с. 83]. Как отмечалось в той же работе, современные цифровые данные о рельефе земной поверхности и развитие ГИС-технологий позволяют получать объективные оценки энергетических характеристик процессов рельефообразования. Поэтому нами на основе ЦМР региона рассчитывалась потенциальная энергия рельефа в районе Беломорско-Кулойского плато и прилегающих территорий. Для получения информации о плотности пород была оцифрована карта литолого-физического районирования [20]. Далее из векторного слоя литолого-физических зон с заданным значением плотности составлялся растровый слой, идентичный по разрешению одному из вариантов ЦМР региона (~90х90 м). Затем с помощью растрового калькулятора SAGA GIS в каждой ячейке ЦМР рассчитывалось значение потенциальной энергии по формуле (3):

$$E = g \cdot \sigma \cdot S \cdot h^2, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения, σ — плотность пород, S — площадь ячейки, h — значение высоты ячейки.

Характеристики свойств земной коры («эндогенный» модуль). Для учета геологических факторов повышенной опасности был проведен анализ геолого-геофизических данных на глобальном (Арктический сегмент земной коры), региональном (Балтийский щит и Русская плита) и локальном уровнях, который показал, что тектонические структуры древних платформ испытывают постоянные подвижки разного знака и интенсивности [3]. Была проведена оценка возможностей цифрового моделирования рельефа для выделения тектонических нарушений, и определены отражающие их геоморфометрические параметры [21]. На глобальном уровне земная кора региона испытывает объемное сжатие из-за воздействия зон спрединга, что должно сопровождаться возникновением продольных изгибов земной коры, выделение которых позволяет фиксировать структуры глубинного тепло- и массопереноса. Для этого нами был проведен анализ пространственных закономерностей отражения структур фундамента в современном рельефе с применением методики и программного обеспечения, разработанных авторами [3, 21]. Вопрос этот имеет не только теоретическое, но и практическое значение, так как наследование и/или отсутствие одного позволяет сделать вывод о: миграции глубинных флюидов; проникновении загрязняющих веществ по латерали и вертикали; возможной активизации разломов при разработке месторождений полезных ископаемых.

Процесс создания цифровой модели рельефа кровли фундамента включал оцифровку изогипс глубин залегания фундамента и создание цифровой модели в среде ESRI ArcGIS 10 с применением модуля Topho to Raster. Цифровая модель дневного рельефа региона строилась на основе подготовленной модели ASTER GDEM v.2 [5]. Поскольку высота рельефа земной поверхности измеряется десятками и сотнями метров, а глубина залегания фундамента – километрами, произвести анализ зависимости величин друг от друга графически представляется затруднительным. Поэтому было проведено масштабирование значений высот рельефа дневной поверхности $R(x)$ и глубин фундамента $F(x)$ в диапазоне от 0 до 1. В результате были получены матрицы значений глубины залегания фундамента MF_n и значений высоты рельефа MR_n . Дальнейший анализ осуществлялся на основе анализа значений матриц разности и суммы. Комбинируя значениями матриц разницы и суммы, мы провели районирование исследуемой территории

по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе. Прямой характер отражения имеет 61% территории, обратный – 25%, районы, где отражение не отмечается, – 14% территории. Полученные данные говорят о влиянии подвижек земной коры на структуру современного рельефа и, как следствие, на экзогенные процессы.

Существуют данные, позволяющие утверждать о влиянии тектонических процессов на развитие карста. Для выделения зон вероятной активизации карстового процесса нами был применен метод обнаружения бессточных впадин, обычно используемый при гидрологической коррекции ЦМР для устранения ошибок. Подробно методика описана в работе [11]. В результате получена карта плотности бессточных впадин на единицу площади.

Для учета современной эндогенной активности нами были рассчитаны коэффициент дискретности, удельная энергоёмкость мегаблоков [22], плотность разломов, функция дробления и изгибные деформации кровли фундамента европейского Севера России. Исследование вышеперечисленных параметров и отражения блоков с разными параметрами в геоморфометрических характеристиках современного рельефа является актуальным при геологических исследованиях. М.А. Садовским сформулировано положение о том, что геологическая среда всегда находится в критическом энергонасыщенном состоянии (с глубины 5–6 км) и основные сейсмические события всегда происходят только по межблоковым структурам [23], то есть структурам с повышенной энергоёмкостью и раздробленностью. Коэффициент дискретности, характерный для взаимоотношения блоков разных порядков, рассчитывался по формуле (4).

$$L_{i+1}/L_i = K, \quad (4)$$

где K – коэффициент перехода от одного ранга блоков к другому;

L_i – максимальная ширина исследуемого геоблока; L_{i+1} – максимальная ширина геоблока следующего порядка.

K_{cp} , характерные для мегаблоков и трансблоковых зон, рассчитывались как среднее арифметическое по формуле (5):

$$K_{cp} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n K_i), \quad (5)$$

Значения K_{cp} , дополненные расчетами их энергоемкости, позволяют уточнить современную геодинамику земной коры и проявление внутриплитной сейсмичности. Формула расчета энергоемкости (6) приведена ниже:

$$W_{\text{з/с}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3(3M - E)}{ME} (pgH)^2 + \frac{1}{2M} \cdot \left(\frac{E_c}{V_{or}} \right)^2, \quad (6)$$

где M – модуль сдвига; E – модуль Юнга; ρ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; H – глубина залегания слоя; E_c – сейсмическая энергия землетрясения; V_{or} – объем блока.

Следует отметить, что расчеты дискретности и энергоемкости проводятся в пределах одноранговых структур земной коры и не дают общей характеристики территории. К тому же в этом варианте учитываются не все разломные структуры, так как далеко не все разломы являются структурообразующими. Поэтому для уточнения структуры земной коры нами были рассчитаны плотность разломов и функция дробления (по методике, предложенной А.И. Ивановым [24]). Для выделения участков повышенной плотности использовалась схема глубинных разломов [25] масштаба 1:10 000 000. Методом «скользящего окна» была подсчитана их плотность. Размер окна – 100×100 км с перекрытием в 50 км.

Функция дробления («блочности») позволяет оценить предрасположенность конкретной структуры к разрушению ее целостности. Статистической мерой «блочности» квазиоднородного участка по [24]

является произведение расстояний между точками деления в направлениях 1, 2, 3 соответственно (7):

$$B = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3. \quad (7)$$

B (по [24]) изменяется в интервале $0 \div 1$, так как длины (L) в произведении (7) были масштабированы на единицу. Выбор такой меры становится понятным, если представить вид трещиноватости участка как три взаимно перпендикулярные серии трещин с густотами λ_k , $k=1, 2, 3$. В этом случае сомножители распределены по экспоненциальному закону; закон распределения имеет вид, представленный в формуле (8), которая была нами применена при расчетах функции дробления («блочности»).

$$f(B) = \frac{1}{2} \ln^2 B. \quad (8)$$

Далее был проведен анализ изгибных деформаций земной коры. Нами были выделены участки устойчивого направления максимальной главной кривизны изгибных деформаций, представленной на карте из [26] в виде прямых линий, которые затем были спроецированы на стереографическую проекцию верхней полусферы сетки Вульфа. В пределах выделенных участков строились сводные розы-диаграммы направлений кривизны изгиба, вызванных современными движениями земной коры. Полученные данные сопоставлялись с геоморфометрическими параметрами [3]. Результаты были верифицированы на отдельных участках и показали высокую корреляцию с облачностью и структурой растительного покрова. Методика и полученные результаты подробно описаны в работе [27].

Результаты

Таким образом, нами была разработана комплексная методика геоэкологического районирования равнинных территорий Российской Федерации от выбора ЦМР и ПО до создания карт геоэкологического районирования региона и районирования по интенсивности протекания эрозионных и аккумулятивных процессов. Геоморфометрический анализ, дополненный расчетными данными о строении земной коры, позволил выделить зоны, потенциально опасные по совокупности факторов (рис. 3).

Так, например, вдоль границы Беломорского мегаблока расположены зоны развития экзогенных процессов. Эта территория характеризуется высокими значениями: коэффициента дискретности, энергоемкости, плотности разломов, функции дробления, а также максимальными значениями главной кривизны изгиба земной коры и индекса расчлененности рельефа (рис. 3). То есть для активизации экзогенных и эндогенных процессов здесь необ-

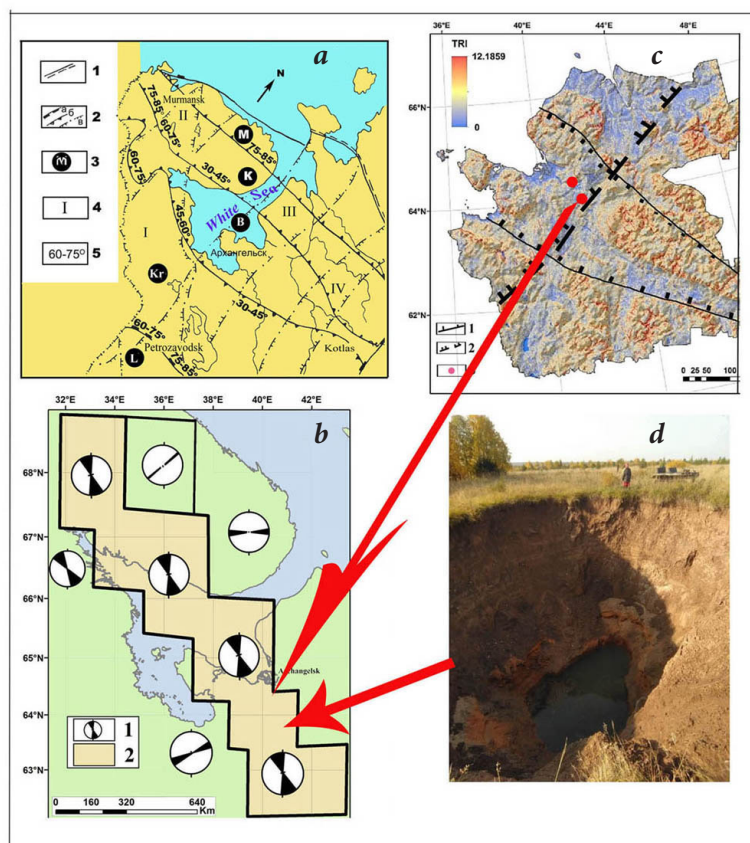


Рис. 3. Схема сопоставления материалов: а – разломно-блоковая тектоника Европейского Севера России, б – зона устойчивого максимального изгибания блоков, с – индекс расчлененности рельефа (красные точки – новые землетрясения), д – карстовая впадина (2021 г.)

ходимо минимальное приложение сил внешнего воздействия, что подтверждается современными сейсмическими событиями и начавшейся активизацией карстовых процессов. В этой зоне расположены основные районы антропогенной деятельности региона, в том числе Архангельская и Котласская городские агломерации.

В результате проведенных исследований нами разработана методика геоэкологического районирования равнинных территорий арктической и приарктической зон России с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа. Такой комплексный подход не имеет аналогов, позволяет учесть влияние на состояние окружающей среды природных факторов и оценить их опасность для функционирования техногенных объектов.

Литература

1. В.С. Круподеров, Б.М. Крестин, И.В. Мальнева, В.И. Дьяконова
Геоэкология. Инженерная геоэкология, гидрогеология, геоэкология, 2012, №3, 389.
2. В.В. Бронгулев, М.П. Жидков, А.Г. Макаренко
Доклады Академии наук, 2004, 399(4), 540.
3. Ю.Г. Кутинов
Современный геодинамический режим Арктического сегмента земной коры и нефтегазообразование, РФ, Пенза, НИЦ «Социосфера», 2021, 281 с.
4. А.Л. Минеев, Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова
Пространство и Время, 2017, №2-3-4, 267.
5. Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, Е.В. Полякова, З.Б. Чистова
Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области), РФ, Пенза, НИЦ «Социосфера», 2019, 176 с.
6. L. Wang, H. Liu
Int. J. Geogr. Inf. Sci., 2006, 20(2), 193.
DOI: 10.1080/13658810500433453.
7. М.Ю. Гофаров, И.Н. Болотов, Ю.Г. Кутинов
Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: Тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров, РФ, Екатеринбург, Изд. УрО РАН, 2006, 158 с.
8. F.R. Troeh
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1964, 28(6).
9. L. Morissette, S. Chartier
Tutor. Quant. Methods Psychol., 2013, 9(1), 15.
DOI: 10.20982/tqmp.09.1.p015.
10. М.М. Мехбалиев
Геоморфология, 2009, №4, 45.
DOI: 10.15356/0435-4281-2009-4-45-52.
11. Е.В. Полякова, Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, З.Б. Чистова, Т.Я. Беленович
Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки, 2021, 163(2), 302.
DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
12. Е.В. Шаврина, В.Н. Малков, Е.И. Гуркало
Геоморфология, 2007, № , 90.
13. Атлас Архангельской области, СССР, Москва, ГУТК СССР, 1976, 176 с.
14. М.Г. Губайдуллин
Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского Севера России, РФ, Архангельск, Поморский госуниверситет, 2002, 310 с.
15. H. Koren
Cloud detection in MODIS images, NR note SAMBA/28/09, 2009, 33 pp.

16. **A.N. Strahler**
Eos, Transactions American Geophysical Union, 1957, **38**(6), 913.
17. **И.Ю. Чернова, И.И. Нугманов, А.Н. Даутов**
Геоинформатика, 2010, №4, 9.
18. **А.С. Кузнецов**
Современные проблемы науки и образования, 2014, №6, 1688.
(<https://science-education.ru/ru/article/view?id=16839>).
19. **Б.А. Казанский**
Геотектоника, 2006, №2, 83.
20. **Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова**
Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах, РФ, Архангельск, ОАО «ИПП «Правда Севера», 2004, 283 с.
21. **Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев**
Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты), РФ, Пенза, НИЦ «Социосфера», 2020, 378 с.
22. **Ю.Г. Кутинов, Т.Я. Беленович, З.Б. Чистова**
Вестник геонаук, 2021, **11**(323), 16.
DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.
23. **М.А. Садовский**
Избранные труды. Геофизика и физика взрыва, под ред. В.В. Адушкина, РФ, Москва, Наука, 2004, 440 с.
24. **А.И. Иванов**
В Сергеевские чтения, Вып. 3, *Матер. годичн. сессии РАН*, РФ, Москва, ГЕОС, 2001, 364 с.
25. *Схема зон глубинных разломов территории СССР (по геофизическим данным)*, СССР, Москва, Мингео СССР, под ред. Д.М. Мильштейна, 1979.
26. **А.Ф. Грачев, В.А. Магницкий, Ш.А. Мухамедиев, С.Л. Юнга**
Доклады Академии наук, 1995, **340**(3), 389.
27. **Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Н.А. Неверов**
Вестник Московского университета. Сер. 5. География, 2020, №5, 12.

[illegible]

Methodology for Analyzing the State of the Natural Environment of the Plain Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation*

Yury G. Kutinov

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
kutinov@fciarcic.ru

Zinaida B. Chistova

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
zchistova@yandex.ru

Elena V. Polyakova

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
lenpo26@yandex.ru

Alexandr L. Mineev

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
mineew.al@gmail.com

Taisija Ya. Belenovitch

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
belenovichtya@yandex.ru

Nikolay A. Neverov

N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
na-neverov@yandex.ru

Abstract

The purpose of the study is to develop a methodology for integrated geoeological zoning of the northern plain territories of the Russian Federation based on digital elevation models. Geomorphometric elevation parameters have been calculated to take into account: a) exogenous factors; b) endogenous factors – the coefficient of discreteness and energy intensity, fault density and the function of crushing the Earth's crust. Such an integrated approach has no analogues and allows taking into account the impact on the state of the environment of exogenous and endogenous, climatic and other natural factors at the global, regional and local levels. As a result, a methodology for integrated geoeological zoning of the northern plain territories of the Russian Federation was developed on the basis of modern digital elevation models using GIS technologies and maps of geoeological zoning.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, digital relief model, endogenous and exogenous processes, methods of geoeological zoning.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60024) and Federal Budget allocations (state target 122011300380-5).*

Images & Tables

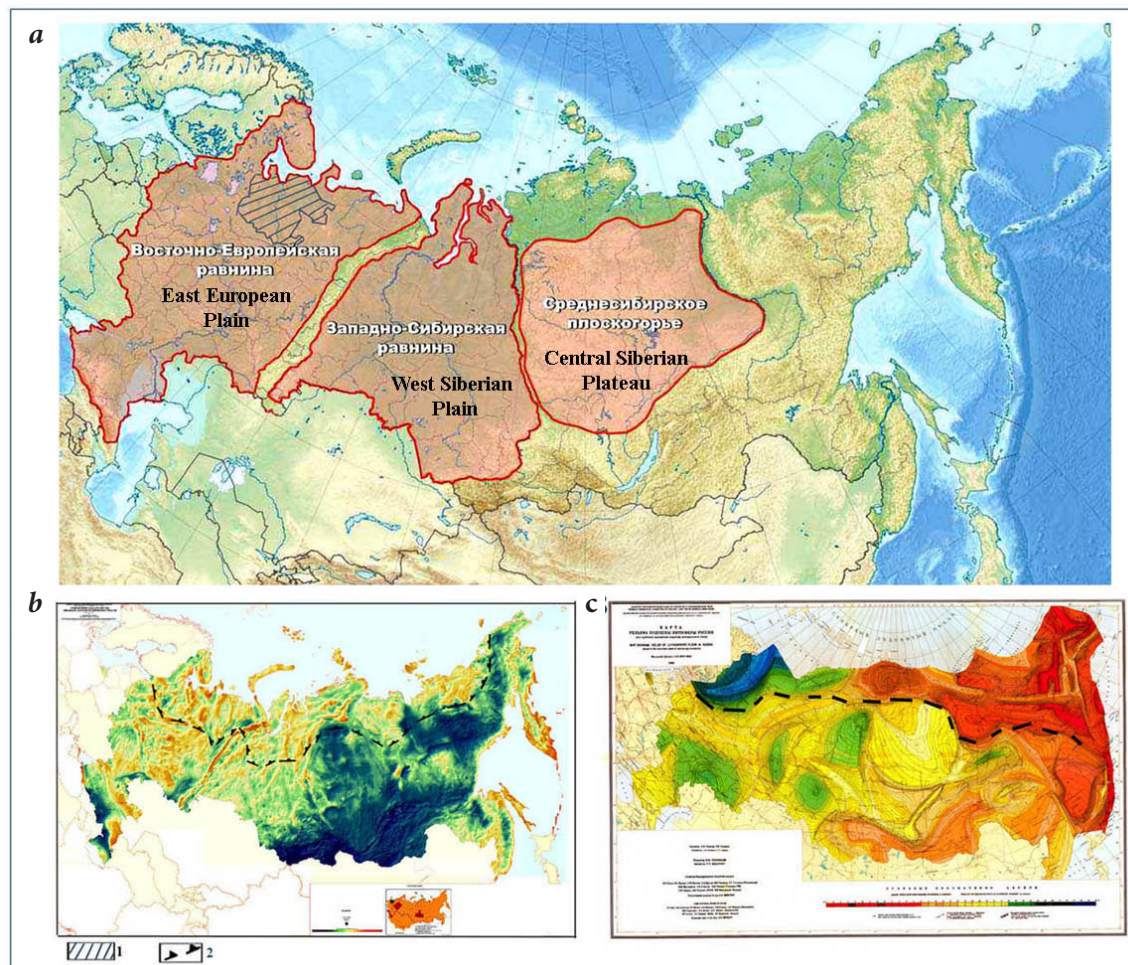


Fig. 1. Comparative characteristics of the selected research area: a – the position of the plain territories; b – gravimetric map of Russia; c – the relief map of the lithosphere basement of Russia; the hatching indicates: 1 – the area of the studied region; 2 – boundary of the area of dynamic influence of the spreading zone.

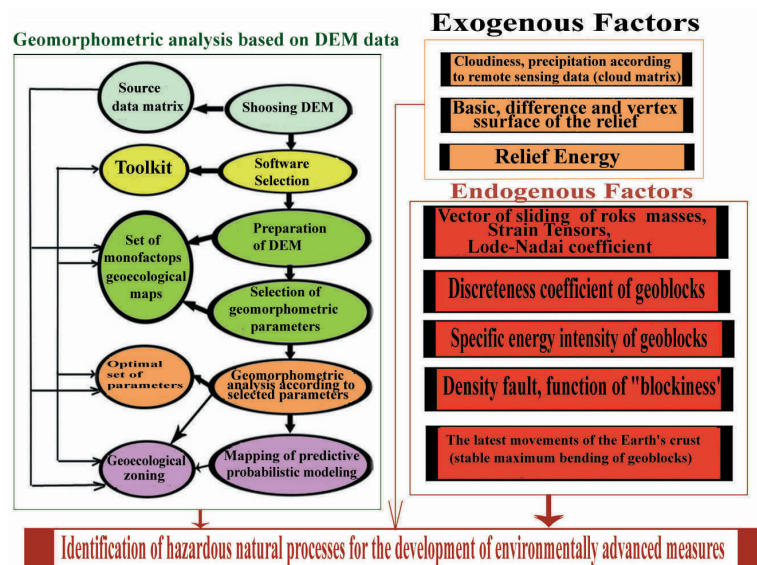
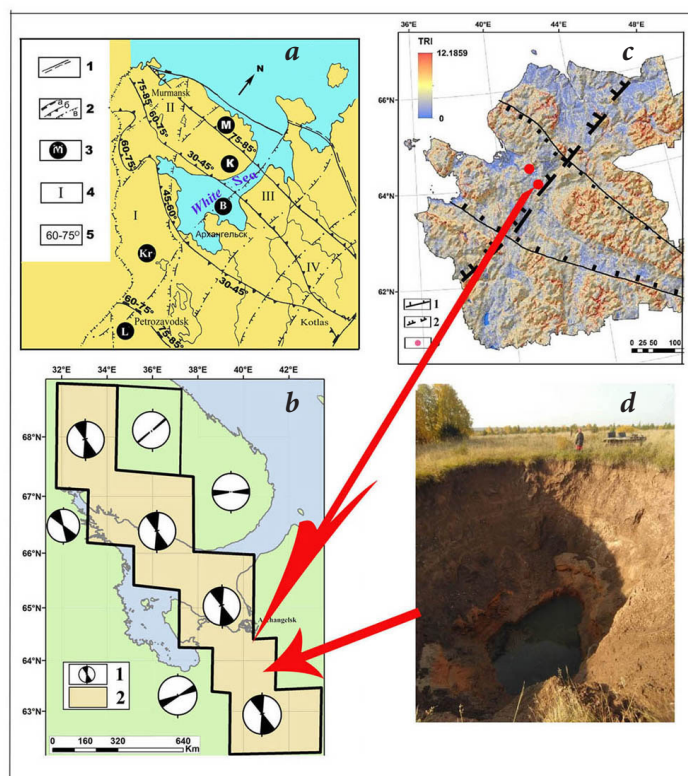


Fig. 2. Algorithm of geo-ecological zoning of plain territories of the Arctic zone of the Russian Federation.

Table 1. Formulas for calculating the main relief parameters

Parameter	Formula
Slope	$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$
Curvature	Plane curvature $PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$ Profile curvature $ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2) \cdot (1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$
Catchment area	$f_i = \frac{\max(0, Slope_i^p)}{\sum_{j=1}^8 (\max(0, Slope_j^p))}$
Stream Power Index	$SPI = A \cdot \tan(\beta)$
Mass Balance Index	$MBI = \begin{cases} f(TC) \cdot (1 - f(S)) \cdot (1 - f(VDN)), \\ f(TC) \cdot (1 + f(S)) \cdot (1 + f(VDN)), \end{cases}$ $f(x) = \frac{x}{ x + F}$
Aspect	$ASPECT = 180^\circ - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90^\circ \cdot \left(\frac{G}{ G }\right)$
Terrain Ruggedness Index	$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{ij})^2}$
Topographic Wetness Index	$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right)$
LS-factor	$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n$
Photosynthetically active radiation (FAR)	$FAR = 0.42S + 0.60D$

**Fig. 3.** Scheme of comparison of materials: a – fault-block tectonics of the European North of Russia; b – the zone of stable maximum bending of blocks; c – Terrain Ruggedness Index (red dots – new earthquakes); d – karst depression (2021).

References

1. V.S. Krupoderov, B.M. Krestin, I.V. Malneva, V.I. Dyakonova
Geokologiya. Linzhernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya [Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocriology], 2012, №3, 389 (in Russian).
2. V.V. Brongulev, M.P. Zhidkov, A.G. Makarenko
Doklady Akademii Nauk [RAS Proceedings], 2004, 399(4), 540 (in Russian).
3. Yu. G. Kutinov
Modern Geodynamic Regime of the Arctic Segment of the Earth's Crust and Oil and Gas Formation [Sovremennyye geodinamicheskye rezhim Arkticheskogo segmenta zemnoy kory i neftegazobrazovanie], RF, Penza, NITs «Sociosfera» Publ., 2021, 281 pp. (in Russian).
4. A.L. Mineev, Yu. G. Kutinov, Z.B. Chistova, E.V. Poljakova
Space & Time [Prostranstvo i vremya], 2017, №2-3-4, 267 (in Russian).
5. Yu. G. Kutinov, A.L. Mineev, E.V. Poljakova, Z.B. Chistova
Selection of a Basic Digital Elevation Model (DEM) of the Plains of the North of Eurasia and Its Preparation for Geological Zoning (Case Study on Arkhangelsk Region) [Vybor bazovoy tsifrovoy modeli reliefa (TcMR) ravninnykh territory Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo rayonirovaniya (na primere Arkhangelskoy oblasti)], RF, Penza, NITs «Sociosfera» Publ., 2019, 176 pp. (in Russian).
6. L. Wang, H. Liu
Int. J. Geogr. Inf. Sci., 2006, 20(2), 193.
DOI: 10.1080/13658810500433453.
7. M.Yu. Gofarov, I.N. Bolotov, Yu. G. Kutinov
Landscapes of the White Sea – Kuloy Plateau: Tectonics, Underlying Rocks, Relief and Vegetation [Landschafty Belomorsko-Kuloy'skogo plato: Tektonika, podstilayushchie porody, relief i rastitelnyy pokrov], RF, Ekaterinburg, UrBof RAS Publ., 2006, 158 pp. (in Russian).
8. F.R. Troeh
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1964, 28(6).
9. L. Morissette, S. Chartier
Tutor. Quant. Methods Psychol., 2013, 9(1), 15.
DOI: 10.20982/tqmp.09.1.p015.
10. M.M. Mehbaliev
Geomorfologiya, 2009, №4, 45 (in Russian).
DOI: 10.15356/0435-4281-2009-4-45-52.
11. E.V. Poljakova, Yu. G. Kutinov, A.L. Mineev, Z.B. Chistova, T.Ya. Belenovitch
Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta. Ser. Estesvennyye nauki [Studies of Kazan University. Ser. Natural Sciences], 2021, 163(2), 302 (in Russian).
DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
12. E.V. Shavrina, V.N. Malkov, E.I. Gurkalo
Geomorfologiya, 2007, №2, 90 (in Russian).
13. Atlas of Arkhangelsk Region [Atlas Arhangelskoy oblasti], USSR, Moscow, GUGK SSSR Publ., 1976, 176 pp. (in Russian).
14. M.G. Gubaidullin
Geocological Conditions for the Development of Mineral Resources of the European North of Russia [Geologicheskie uslovia osvoeniya mineralno-syrevykh resursov Evropeyskogo Severa Rossii], RF, Arkhangelsk, Pomorsky State Univ. Publ., 2002, 310 pp. (in Russian).
15. H. Koren
Cloud detection in MODIS images, NR note SAMBA/28/09, 2009, 33 pp.
16. A.N. Strahler
Eos, Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(6), 913.
17. I.Yu. Chernova, I.I. Nugmanov, A.N. Dautov
Geoinformatika, 2010, №4, 9 (in Russian).
18. A.S. Kuznetsov
Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2014, №6, 1688 (in Russian).
(<https://science-education.ru/ru/article/view?id=16839>).
19. B.A. Kazanskii
Geotectonics, 2006, 40(2), 150.
20. Yu. G. Kutinov, Z.B. Chistova
Hierarchical Series of Alkaline-Ultrabasic Magmatism Manifestations in Arkhangelsk Diamondiferous Province. Their Reflection in Geological and Geophysical Materials [Ierarkhicheskiy ryad proyavleniy shchelochno-ultraosnovnogo magmatizma Arkhangelskoi almazonosnoy provintsi. Ikh otrazhenie v geologo-geofizicheskikh materialakh], RF, Arkhangelsk, OJSC “IPP “Pravda Severa”, 2004, 283 pp. (in Russian).
21. Yu. G. Kutinov, Z.B. Chistova, E.V. Polyakova, A.L. Mineev
The Use of Digital Elevation Models (DEM) to Highlight the Tectonic Structures of Ancient Platforms (Case Study on the North-West Region of the Russian Plate) [Primenenie tsifrovyykh modelei reliefa (TsMR) dlya vydeleniya tektonicheskikh struktur drevnikh platform (na primere severo-zapada Russkoy plity)], RF, Penza, NITs «Sociosfera» Publ., 2020, 378 pp. (in Russian).
22. Yu. G. Kutinov, T.Ya. Belenovitch, Z.B. Chistova
Vestnik of Geosciences, 2021, 11(323), 16 (in Russian).
DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.
23. M.A. Sadovsky
Selected Works. Geophysics and Explosion Physics [Izbrannyye trudy. Geofizika i fizika vzryva], Ed. V.V. Adushkin, RF, Moscow, Nauka Publ. House, 2004, 440 pp. (in Russian).
24. A.I. Ivanov
In Sergeevskie chteniya. Mater. godichn. sessii RAN. Vyp.3 [Sergeev Readings, Vol. 3, Proc. Annual Session of RAS], RF, Moscow, GEOS Publ. House, 2001, 364 pp. (in Russian).
25. Scheme of Deep Fault Zones in the USSR Territory (according to Geophysical Data) [Shema zon glubinykh razlomov territorii SSSR (po geofizicheskim dannym)], USSR, Moscow, Mingeo USSR Publ., Ed. D.M. Milshtein, 1979 (in Russian).
26. A.F. Grachev, V.A. Magnickij, Sh.A. Muhamediev, S.I. Junga
Doklady Akademii Nauk [RAS Proceedings], 1995, 340(3), 389 (in Russian).
27. Yu. G. Kutinov, Z.B. Chistova, N.A. Neverov
Vestnik Moskovskogo Universiteta, Ser. 5, Geografiya [Bulletin of MSU, Ser. 5, Geography], 2020, №5, 12 (in Russian).

Изотопно-геохимические исследования подземных вод в Заполярном районе Ненецкого автономного округа*

А.И. Малов

Изучен водоносный горизонт песчаных отложений в таликовой зоне долины реки Печоры. Использование информации о распределении изотопов трития позволило прояснить условия питания подземных вод и генетическую структуру их на различных участках водоносного горизонта. Тритиевый возраст подземных вод в береговых скважинах составил 20–25 лет, на основании чего был сделан вывод о практически полном замещении подземных вод, поступивших в водоносный горизонт до 1995–2000 гг. В скважинах, удаленных от берега реки, возраст воды находится в интервале от 20 до 50 лет. Однако в отличие от береговых скважин, в этих подземных водах присутствует «бомбовая» вода и старая вода, поступавшая в водоносный горизонт до 1952 г. Возраст старой воды достигает 12.9 ± 2.5 тысяч лет. Установлено, что с уменьшением возраста изменяется соотношение между стабильными ^{13}C и радиоактивными ^{14}C изотопами углерода, свидетельствующее о процессе повышения углеродного обмена между растворенным неорганическим углеродом и почвенным углекислым газом, вызванном оттаиванием многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: подземные воды, датирование, тритий, изотопы углерода, изотопы урана, Арктика.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-05-00045).

Введение

Для арктических регионов характерно широкое развитие многолетней мерзлоты. На основной площади подземные воды имеют крайне ограниченное распространение и приурочены к речным и озерным таликам небольшой мощности. Водовмещающие породы в таликах представлены в основном мелкозернистыми песками кварц-полевошпатового состава. С поверхности развит слой сезонно-талых пород, зачастую не протаивающий полностью. В этих условиях водообмен в талом слое затруднен, что и определяет специфику состава подземных вод. Высокие содержания органики в условиях относительно застойного режима способствуют созданию повышенных концентраций аммония, фосфатов, железа и марганца, а также росту показателей цветности, мутности, окисляемости. Вместе с тем при крайне

сложной обстановке с водоснабжением на основной площади, когда жители поселков и нефтедобывающих предприятий вынуждены зачастую топить лед и снег в зимний период, использование этих таликов для устройства скважинных водозаборов с последующей очисткой воды на установках водоподготовки существенно улучшает условия жизни местного населения [1].

В арктических районах потепление приводит к изменениям погодных и экологических условий, связанных, в частности, с интенсификацией деградации многолетней мерзлоты, замедлением формирования и более ранним разрушением ледового покрова, повышением эрозионной активности рек и нагонных явлений, переформированием берегов [2]. Эти факторы изменяют питание подземных вод дождевыми и талыми водами, взаимодействие их с водами водотоков и водоемов, геологические условия и водно-физические свойства грунтов [3, 4]. В результате изменяются такие параметры подземных вод, как уровенная поверхность, химический состав, температура и расход [5]. По некоторым оценкам такие климатические изменения могут негативно отражаться на здоровье людей, связанном с погодой, снижением водной безопасности и распространением болезней [6, 7].



МАЛОВ

Александр Иванович

Директор Института геодинамики и геологии имени Ф.Н. Юдахина
Федеральный исследовательский
центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН

Наличие ядерного полигона на арктических островах Новая Земля, захоронения на Карской стороне Новоземельского архипелага и в различных районах Баренцева моря значительных объемов твердых и жидких радиоактивных отходов [8, 9], последствия Чернобыльской аварии [10, 11], проведение подземного ядерного взрыва с целью ликвидации газового фонтана на территории газоконденсатного месторождения “Пирит” [12] диктуют необходимость учета и оценки влияния радиационной обстановки на качество подземных вод в регионе.

Таким образом, основными проблемами при оценке доступных ресурсов питьевых подземных вод в арктических регионах можно считать следующие:

- 1) влияние условий питания подземных вод на их качество;
- 2) влияние времени нахождения воды в водоносном горизонте на ее качество;
- 3) влияние радиационной обстановки на качество подземных вод.

Эти проблемы эффективно решаются с помощью использования комплекса радиоактивных изотопов, таких, например, как тритий ^3H , радиоуглерод ^{14}C , уран ^{234}U , ^{238}U [13–15].

Тритий – радиоактивный изотоп водорода – это β -излучатель с периодом полураспада 12.32 года. Его природная концентрация в пресной воде составляет порядка 5–10 тритиевых единиц (ТЕ), то есть он практически полностью распадается в течение 60–70 лет. Однако в 1952–1962 гг. произошло интенсивное накопление трития от термоядерных взрывов в атмосфере, вследствие чего его концентрация в отдельных пунктах Земли в 1962 г. достигала $(3\text{--}10) \cdot 10^3$ ТЕ [16, 17]. В таком случае его концентрация в подземных водах теоретически могла достигать в 2020 г. 115–384 ТЕ. Например, концентрация трития была измерена в снеге, выпавшем на востоке Антарктиды (пробы отбирали из снежных ям глубиной до 364 см, что соответствовало периоду последних 60 лет), и оказалась в пределах 8.2–432.1 ТЕ [18, 19]. В подземных водах, используемых для водоснабжения Екатеринбурга в 1998 г., были установлены содержания трития 78–107 ТЕ [20]. Рассчитанная по этим значениям доза облучения населения находилась на уровне 50% от установленного дозового предела [21].

В данной работе поставлены следующие задачи:

- 1) оценить концентрации трития в подземных водах исследуемого региона и возможность наличия следов «бомбового пика»;
- 2) использовать информацию о распределении трития для выяснения условий питания подземных вод на основе их датирования и анализа химического состава;

- 3) использовать изотопы углерода и урана для идентификации старых подземных вод с возрастом более 60–70 лет, которые могут подтягиваться из нижних частей водоносного горизонта или перетекать из нижележащих водоносных горизонтов;
- 4) оценить влияние старых подземных вод на качество питьевых вод.

Материалы и методы

Места отбора проб расположены в западной части российской Арктики вблизи города Нарьян-Мар. Здесь, в таликовой зоне реки Печоры, расположены три основных водозабора питьевых подземных вод: Озерный, Курья и Факел. Первые два эксплуатируют скважины, подающие воду из аллювиального горизонта песков современного возраста (aIV), в последнем откачивают воду из морских песков бызовского горизонта (mIIIbz).

Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений (aIV) залегает первым от поверхности, его мощность 28–33 м. Водовмещающие породы представлены однородной толщей мелко-среднезернистых песков. Водоупором являются ледниково-морские глины и суглинки вычегодского горизонта (gmIIvč). Их мощность составляет до 30 м, в среднем 10 м. Водоупор отделяет водоносный горизонт от подземных вод нижнемелового водоносного комплекса (K_1). Водозаборы Озерный и Курья содержат 17 и 2 эксплуатационных скважины, соответственно, глубиной 28–33 м. Водоносный горизонт верхнечетвертичных морских песков бызовского горизонта (mIIIbz) приурочен с юго-востока к водоносному горизонту современных аллювиальных отложений, слагая надпойменную террасу. Граница между речным таликом и зоной развития многолетнемерзлых пород располагается

в 750 м юго-восточнее водозабора Факел, в 1.5 км юго-восточнее водозабора Курья и в 4 км юго-восточнее водозабора Озерный. Водоносный комплекс нижнемеловых алевролитов и песчаников мощностью 100–300 м развит повсеместно и отделен от продуктивных горизонтов ледниково-морскими отложениями вычегодского возраста. Воды пресные до глубины примерно 50 м; глубже они повышают минерализацию от 1.2 до 15.8 г·л⁻¹ и содержание хлорид-иона от 0.2 до 7.8 г·л⁻¹. По химическому составу эти воды хлоридно-натриевые.

В июле 2020 г. нами был выполнен отбор 50 проб подземных вод из эксплуатационных скважин. Пробоподготовка осуществлялась непосредственно в поле. Для определения концентрации изотопов углерода $\delta^{13}\text{C}$ и ^{14}C в пробах подземных вод объемом по 100 литров выполнялось осаждение карбонатов. Для определения содержания изотопов урана ^{234}U , ^{238}U в пробах подземных вод объемом 20 литров осаждался уран. Для определения концентрации катионов (10 мл) и анионов (50 мл) пробы фильтровали через 0.45 мкм ацетатцеллюлозный фильтр. Отфильтрованные пробы для определения катионов подкисляли 2–3 каплями HNO_3 ; пробы для определения анионов не подкисляли. Для определения изотопов трития (500 мл) пробы отбирали в пластиковые бутылки с крышками, без пузырьков воздуха. Пробы не консервировали. Пробы для определения трития изолировали скотчем и изолентой. Две пробы были отобраны из реки Печоры в марте (зимняя межень) и в мае (паводок).

Температуру воды, $p\text{H}$ и Eh измеряли в полевых условиях с помощью портативных приборов HANNA. Концентрации катионов определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра (ААС) (Perkin-Elmer 5100 PC). Щелочность измеряли потенциометрическим

титрованием HCl на автоматическом титраторе (Metrohm 716 DMS Titrino). Концентрации основных анионов (Cl^- , SO_4^{2-}) измеряли методом ионной хроматографии (HPLC, Dionex ICS 2000). Измерения объемной активности трития выполнялись с использованием метода жидкостной сцинтилляции. Подготовка воды заключалась в химической очистке и дистилляции первичной пробы, а также в ее обогащении на установке электролитического обогащения трития, изготовитель НПО «Тайфун». При выполнении измерений объемной активности трития использовался низкофоновый жидкосцинтилляционный счетчик «Quantulus-1220» (PerkinElmer, Finland). Изотопы урана в подземных водах определяли по методическим указаниям ВИМС. Спектрометрическое детектирование альфа-частиц проводили на альфа-спектрометре «Прогресс-альфа».

Для определения радиоуглерода из полученных образцов CaCO_3 получали бензол. Активность ^{14}C бензола измерялась на сцинтилляционном спектрометре Quantulus 1220. Измерения отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) выполнены на масс-спектрометре Thermo Finnigan Delta V Advantage IRMS, подключенном к модулю Thermo Scientific GasBenc.

Для оценки возраста подземных вод по тритию использовалась модель, описанная в [17]:

$$t = \frac{\ln(^3H_0/^3H_t)}{\lambda_3} = \frac{12.32}{\ln 2} \ln \frac{^3H_0}{^3H_t}, \quad (1)$$

где t – возраст подземных вод, годы; λ_3 – постоянная распада для ^3H , с⁻¹; 3H_0 – активность трития в области питания подземных вод, с⁻¹; 3H_t – активность трития в отобранной пробе воды, с⁻¹. В качестве 3H_0 принималась активность трития в атмосферных осадках и речной воде в реке Печоре в г. Нарьян-Мар в 2000–2019 гг. по [22] и активность трития в атмосферных осадках в 1964–1999 гг. по [16, 17].

Для оценки возраста подземных вод по радиоуглероду использовалась модель [23, 24]:

$$t = -\frac{1}{\lambda_{14}} \ln \frac{^{14}C_{DIC}}{^{14}C_0} = -\frac{5730}{\ln 2} \ln \frac{^{14}C_{DIC}}{^{14}C_0}, \quad (2)$$

где $^{14}C_{DIC}$ – активность ^{14}C в растворенном неорганическом углероде (Dissolved Inorganic Carbon – DIC), рмс (percent of modern carbon – процентов современного углерода); $^{14}C_0$ – исходная активность ^{14}C в области питания подземных вод после поправки на геохимические и физические процессы в водоносном горизонте (без радиоактивного распада), рмс; λ_{14} – постоянная распада ^{14}C , лет⁻¹. Для определения $^{14}C_0$ использовалась модель Ingerson и Pearson [25]:

$$^{14}C_0 = \frac{\delta^{13}C - \delta^{13}C_s}{\delta^{13}C_g - \delta^{13}C_s} (^{14}C_g - ^{14}C_s) + ^{14}C_s, \quad (3)$$

где $^{14}C_s \approx 0$, $\delta^{13}C_s \approx 2\text{‰}$ – изотопный состав твердых карбонатных минералов; $^{14}C_g \approx 100 \text{ pmc}$, $\delta^{13}C_g \approx 26\text{‰}$ – изотопный состав углерода газообразного почвенного CO_2 [25].

Возрасты подземных вод были откалиброваны с использованием программы Calib Rev 8.1.0, в которой используются наборы данных международной калибровки 2020 г. по отношению к IntCal20 [26].

Результаты

Химический состав поверхностных и подземных вод

Общая минерализация поверхностных вод реки Печоры подвержена существенным колебаниям в течение года, изменяясь от $40 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ в период весеннего паводка до $\sim 200 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ в зимнюю межень, но Ca-Mg-HCO_3 состав воды остается постоянным. Общая минерализация пресных подземных вод в районе исследования составляет от 75 до $302 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Минимальные значения общей минерализации $89\text{--}93 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ и $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ состав с относительно повышенным содержанием сульфат-иона ($22\text{--}35 \text{ мг-экв.}\%$) характерны для подземных вод водозабора Факел. Повышенные содержания сульфат-иона $18\text{--}19 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ наблюдаются и в одной из скважин на рядом расположенном водозаборе Курья, но в эквивалент-процентном отношении они существенно ниже, ввиду повышенных до $192\text{--}302 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ значений общей минерализации. В воде этой скважины установлено максимальное содержание ионов хлора и натрия, 61.2 и $66.7 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, соответственно; вследствие этого вода приобрела $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$ состав. На водозаборе Озерный подземные воды контрастно различаются в береговых скважинах и в скважинах, расположенных на удалении от реки. В удаленных от реки скважинах общая минерализация находится в интервале $75\text{--}147 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, характерен Ca-HCO_3 состав. В береговых скважинах общая минерализация повышается до $151\text{--}231 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, концентрации хлорид-иона достигают $16\text{--}44 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ ($22\text{--}40 \text{ мг-экв.}\%$), состав становится Ca-Na-HCO_3 и $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$.

На водозаборе Курья установлено максимальное значение pH – 8.71 и минимальное значение Eh – -90.1 мВ . Для воды остальных скважин также характерны относительно низкие значения Eh , от -40.5 до -21.3 мВ . Значения pH колеблются в интервале $6.61\text{--}7.84$.

Изотопный состав поверхностных и подземных вод и датирование подземных вод

Тритий

Максимальные концентрации трития установлены в воде береговых скважин водозабора Озерный (5.93 ± 1.52 и $7.62 \pm 2.03 \text{ ТЕ}$, соответственно) и в воде одной из скважин водозабора Курья ($8.3 \pm 2.12 \text{ ТЕ}$). Для мест расположения этих скважин характерны минимальные абсолютные отметки земной поверхности, а для подземных вод – максимальные значения общей минерализации ($160.9\text{--}213.01 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$).

На рисунке 1а показана схема определения среднего значения возраста воды в этих трех скважинах. В качестве исходных активностей в области питания $^3\text{H}_0$ принимались среднегодовые значения активностей ^3H в речных водах в $1964\text{--}2020$ гг., находящиеся в интервале от 22.6 до 10.6 ТЕ , а в качестве $^3\text{H}_t$ было принято среднее из трех значений, определенных для проб из этих скважин (7.28 ТЕ). На рисунке 1а выделяется отрезок, приуроченный к периоду $1995\text{--}2000$ гг., где значения $t_{\text{фактическое}}$ (от 25 до 20 лет) и $t_{\text{расчетное}}$ (от 24.77 до 20.15 лет) практически совпадают. То есть средний возраст воды, отобранной из трех береговых скважин, может составлять 22.46 ± 2.31 лет. В остальные периоды такие совпадения отсутствуют, а значения $t_{\text{расчетное}}$ превышают значения $t_{\text{фактическое}}$, что говорит о процессах практически полного замещения подземных вод, поступивших в водоносный горизонт до $1995\text{--}2000$ гг., или о смешении этих вод с водами, поступавшими в водоносные горизонты до 1952 г. Этот аспект обсуждается ниже на основе содержаний хлора в этих водах и анализа возможностей подтягивания речных вод к водозабору (см. «Обсуждение»).

Минимальные активности трития установлены в воде скважин водозабора Озерный, расположенных на удалении от реки (от

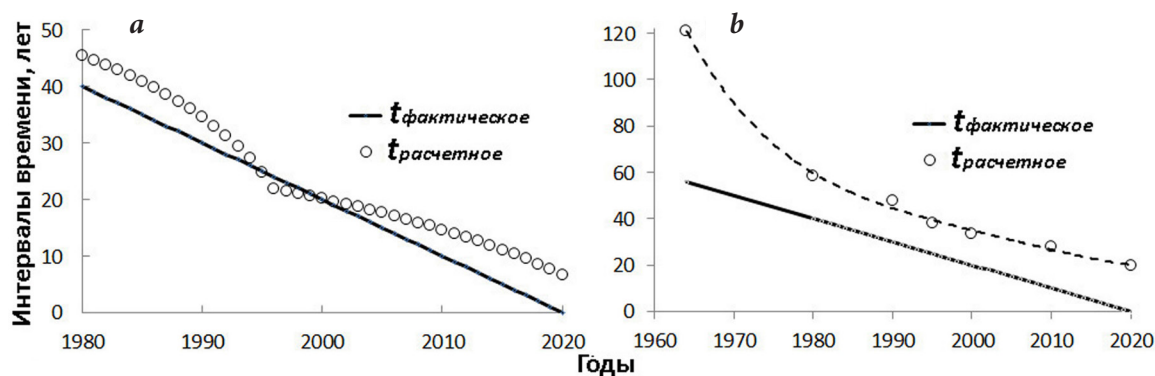


Рис. 1. Схема определения возраста подземных вод по изотопу ^3H . $t_{\text{фактическое}}$ – Интервал времени от момента поступления трития с концентрацией $^3\text{H}_0$ в водоносный горизонт до момента отбора пробы подземных вод в июле 2020 г.; $t_{\text{расчетное}}$ – интервал времени, необходимый для распада трития с концентрацией $^3\text{H}_0$ до средних концентраций, полученных в июле 2020 г.: а – в пробах из трех береговых скважин – 7.28 ТЕ; б – в пробах из остальных скважин, находящихся на удалении от берега реки, – 3.47 ТЕ.

2.54±1.27 до 4.23±1.52 ТЕ), в воде одной из скважин водозабора Курья (3.73±1.44 ТЕ) и в воде скважин водозабора Факел (3.64±1.35 и 2.62±1.27 ТЕ). Для мест расположения этих скважин характерны максимальные отметки земной поверхности (5–10 абс. м), а для подземных вод – минимальные значения общей минерализации (88.89–146.82 мг·л⁻¹). Исключением служит вода из скважины водозабора Курья (4 абс. м и 302.39 мг·л⁻¹), этот аспект обсуждается ниже на основе анализа содержания ^{14}C в этой воде и возможностей перетока солоноватых вод из нижележащих водоносных горизонтов (см. «Обсуждение»). На рисунке 1b показана схема определения среднего значения возраста воды в скважинах с минимальными активностями трития. В качестве исходных активностей в области питания $^3\text{H}_0$ принимались среднегодовые значения активностей ^3H в атмосферных осадках в 1964–2020 гг., находящиеся в интервале от 3200 до 10.6 ТЕ, а в качестве $^3\text{H}_t$ было принято среднее из семи значений, определенных для проб, отобранных из этих скважин (3.47 ТЕ). Для этих водных проб сходимость $t_{\text{фактическое}}$ и $t_{\text{расчетное}}$ не наблюдается, значения $t_{\text{расчетное}}$ повсеместно превышают значения $t_{\text{фактическое}}$. Это может свидетельствовать только о смешении этих вод с водами, поступавшими в водоносные горизонты до 1952 г.

Изотопы углерода

Минимальные активности радиоуглерода установлены в воде одной из скважин водозабора Курья (24.64±0.33 рмс). По ней определен радиоуглеродный ^{14}C возраст подземных вод 8190±210 лет. В воде остальных скважин активность ^{14}C варьирует от 53.4±0.74 до 70.33±0.86 рмс. Значения $\delta^{13}\text{C}$ находятся в интервале от -13.88±0.02 до -16.03±0.01‰, что свидетельствует о преобладании процессов изотопного обмена между растворенным неорганическим углеродом (РНУ) и почвенным углекислым газом [25]. Это связано с преобладанием алюмосиликатных пород в водоносных горизонтах песчаных отложений в долине реки Печоры и высоким содержанием органического вещества в заболоченных почвах. По одной из проб водозабора Озерный также удалось определить ^{14}C возраст подземных вод: 700±200 лет до ядерной эпохи. По остальным пробам радиоуглеродные датировки проблематичны, однако в целом прослеживается тенденция снижения значений $\delta^{13}\text{C}$ и повышения значений $^{14}\text{C}_0$ с уменьшением возраста подземных вод (коэффициент корреляции равен 0.4). Это может свидетельствовать о процессе повышения углеродного обмена между РНУ и почвенным углекислым газом, вызванном оттаиванием многолетней мерзлоты. Этот процесс обычно происходит в области питания подземных вод в условиях открытой системы. Когда многолетняя мерзлота оттаивает, закрытая система подземных вод открывается для почвенного CO_2 , способствуя углеродному обмену между РНУ и почвенным CO_2 [27, 28].

Обсуждение

Эволюция химического состава подземных вод

Содержание Ca^{2+} в воде увеличивается с увеличением общей минерализации до 150 мг·л⁻¹; вода имеет Ca-HCO_3 состав, что объясняется значительной

ролью растворения карбоната кальция в ее образовании. Корреляция ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) с HCO_3^- достигает 100%. Однако с повышением общей минерализации более $150 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ существенную роль в составе воды начинает играть Na^+ . Соответственно отношение $\text{Na}^+ : \text{Ca}^{2+}$ увеличивается до 4.2. Состав подземных вод становится Ca-Na-HCO_3 и $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$, что можно объяснить насыщением подземных вод кальцитом и доломитом и частичным осаждением карбонатов кальция. При этом возрастает относительная роль гидролиза алюмосиликатов натрия. По отношению к теоретическим линиям растворения галита и разбавления морской водой содержание натрия в воде скважины водозабора Курья увеличивается до двух раз. Это свидетельствует о значительной роли других процессов перехода Na^+ в раствор. Можно предположить, что имеет место катионный обмен щелочноземельных элементов со щелочными элементами.

Воды береговых скважин водозабора Озерный имеют более низкое содержание сульфатов и более низкие значения Eh по сравнению с речными водами, что, вероятно, связано с протеканием процессов сульфатредукции в подземных водах. В воде одной из скважин водозабора Курья содержание NaCl в пять раз выше, чем в речной воде, то есть возможно поступление более соленых вод из нижележащего водоносного комплекса нижнемеловых алевролитов и песчаников.

В подземных водах скважин водозаборов Озерный и Факел, расположенных на удалении от реки, содержание всех компонентов ионного состава значительно ниже, чем в речных водах, что может свидетельствовать об их питании за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Датирование подземных вод по тритию

Оценка возможного разбавления воды береговых скважин при условии их атмосферного питания

Расчеты показывают, что вода этих скважин может иметь средний возраст:

- 1) 41 год, если она к 1979 г. была разбавлена водой, поступавшей в водоносный горизонт до 1952 г. в соотношении 3:1 (то есть если произошло смешение 3 частей молодой воды с $^3\text{H}_0 = 98 \text{ ТЕ}$ и одной части старой воды с $^3\text{H}_0 = 0 \text{ ТЕ}$);
- 2) 51 год, если к 1969 г. она была разбавлена в соотношении 1:1;
- 3) 56 лет, если к 1964 г. она была разбавлена в соотношении 5:95.

Но оценочные расчеты показывают, что при величине инфильтрации в области исследований $125 \text{ мм} \cdot \text{г}^{-1}$ и эффективной пористости 0.2 соот-

ношения выглядят иначе, а именно:
1) 1:1.8, 2) 1:2.8 и 3) 1:4.

Оценка возможного разбавления воды береговых скважин при условии их речного питания с перетоком соленых вод из нижележащих горизонтов

Предположим, что: 1) вода этих скважин имела речное питание и содержание хлоридов, соответствующее содержанию хлоридов в реке в период зимнего половодья, $13.3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; 2) содержание хлоридов, соответствующее определенному в береговых скважинах (в среднем $20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$), получено в результате перетока солоноватых и соленых вод из нижележащих горизонтов с содержанием хлоридов от 100 до $7800 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Доля концевых элементов в подземных водах оценивалась по балансу масс в двухкомпонентной системе с использованием наиболее консервативного показателя – хлорида. Расчеты показывают, что смешение должно осуществляться в соотношении 999:1 и 12:1. То есть в этом случае разбавление подземных вод оказывается недостаточным для снижения концентраций трития до $\sim 7.28 \text{ ТЕ}$ к июлю 2020 г. (см. «Результаты»). Разбавление должно было бы быть 2.5:1.

Оценка времени подтягивания к водозаборной скважине речных вод

Время подтягивания к водозаборной скважине первых порций речных вод можно определить по формуле [29]:

$$T_0 = \frac{\theta \cdot a \cdot m}{q} \left[\frac{\frac{Q}{\pi \cdot a \cdot q}}{\sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot a \cdot q} - 1}} \times \right. \\ \left. \times \arctg \frac{1}{\sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot a \cdot q} - 1}} - 1 \right], \quad (5)$$

где T_0 – время подтягивания к водозаборной скважине первых порций

речных вод, дней; a – расстояние от скважины до реки, 100 м; m – мощность водоносного горизонта, 30 м; $q=k \cdot m \cdot i$ – единичный расход естественного потока, $\text{м}^3 \cdot \text{сутки}^{-1}$ (i – уклон естественного потока, 0.0022 м/м; k – коэффициент фильтрации, 18 м·сутки $^{-1}$); θ – активная пористость, 0.2; Q – расход водозаборной скважины, $\text{м}^3 \cdot \text{сутки}^{-1}$.

В 2020 г. на водозаборе Озерный у реки эксплуатировались две скважины с общим расходом Q , равным $800 \text{ м}^3 \cdot \text{сутки}^{-1}$. Принимая, что другие водозаборные скважины не оказывают на них влияния в контексте подтягивания речных вод, получим по формуле (5) $T_0=254$ суток.

Оценку возможного влияния ближайшей эксплуатируемой скважины водозабора, расположенной выше по потоку и находящейся на расстоянии 400 м от этих скважин, можно выполнить по формуле из [29]:

$$x = -\frac{Q}{2\pi q}, \quad (6)$$

где x – расстояние от скважины в сторону реки до нейтральной линии тока, м (то есть расстояние до линии, ограничивающей область, из которой вода может подтягиваться к скважине). При расходе скважины $400 \text{ м}^3 \cdot \text{сутки}^{-1}$ это расстояние составит 64 м. То есть работа этой скважины действительно не окажет практического влияния на процессы подтягивания речных вод к береговым скважинам. Однако эти процессы будут происходить быстрее за счет уменьшения интенсивности расхода естественного потока. По данным режимных наблюдений в зимнюю межень 2004 г. работа водозаборных скважин, расположенных выше по потоку подземных вод, привела к снижению его в два раза (при $i=0.001$). В этом случае расчетное время подтягивания речных вод к береговым скважинам уменьшится до 193 суток. Соответственно, влияние скважины ниже по потоку увеличится в два раза и составит 128 м. Если

же мы учтем влияние всех водозаборных скважин, эксплуатировавшихся с дебитом $2400 \text{ м}^3 \cdot \text{сутки}^{-1}$ и расположенных в среднем на расстоянии 1300 м от реки, то есть в 1200 м от береговых скважин, то получим расстояние в сторону реки до нейтральной линии тока, равное 760 м.

Таким образом, очевидно, что воды с повышенной минерализацией, обнаруженные в береговых скважинах, появились в них ввиду подтягивания речных вод с повышенной минерализацией в периоды зимней межени. В то же время ^3H -возраст подземных вод в береговых скважинах составляет, по нашим оценкам, 20–25 лет. Увеличение времени движения речных вод к береговым скважинам по сравнению с расчетными данными может быть связано с островной многолетней мерзлотой и кольматацией русла реки, вследствие чего подтягивание речных вод к водозабору происходит более сложными путями, чем это предусматривает расчетная формула. В целом, вариант подтягивания речных вод к береговым скважинам и полное замещение ими подземных вод, поступивших в водоносный горизонт до 1995–2000 гг., выглядит наиболее предпочтительным. Из этого можно сделать вывод, что подземные воды, отобранные из береговых скважин в июле 2020 г., имеют среднее время пребывания в водоносном горизонте примерно 22.46 ± 2.31 года.

Оценка возможного разбавления воды скважин, удаленных от берега реки, при условии их атмосферного питания

Расчеты показывают, что вода этих скважин может иметь средний возраст:

- 1) 20 лет, если она к 1999 г. была разбавлена водой, поступавшей в водоносный горизонт до 1952 г. в соотношении 1:1;
- 2) 41 год, если она к 1979 г. была разбавлена в соотношении 1:1.8;
- 3) 51 год, если к 1969 г. была разбавлена в соотношении 1:3.3;
- 4) 56 лет, если к 1964 г. была разбавлена в соотношении 1:39.

Оценочные расчеты показывают, что при величине инфильтрационного питания 125 мм/год и эффективной пористости 0.2 соотношения выглядят следующим образом: 1) 1:1, 2) 1:1.8, 3) 1:2.8 и 4) 1:4. Эти оценки уже более приемлемы по сравнению с результатами аналогичных расчетов для береговых скважин.

То есть возраст подземных вод, отобранных из скважин, удаленных от берега реки, может находиться в интервале от 20 до 50 лет.

Датирование подземных вод по радиоуглероду

Определенный по ^{14}C возраст подземных вод в скважине водозабора Курья – 8190 ± 210 лет – на наш взгляд, является наиболее достоверным. В то же время в воде этой скважины установлена активность трития 3.73 ± 1.44 ТЕ. В этом случае можно проработать модель возможного смешения молодых вод с концентрацией трития, соответствующей среднегодовой объемной активности ^3H в атмосферных осадках в городе Нарьян-Маре в 2019 г. (11 ТЕ), с более древними водами с отсутствием трития, поступавшими из глубоких горизонтов, не затронутых воздействием ядерных взрывов в атмосфере в период 1952–1962 гг:

$$\begin{aligned} {}^3\text{H}_t &= 3.73 \pm 1.44 = 11x + 0(1-x), \\ {}^{14}\text{C}_{\text{Age}} &= 0x + n \cdot (1-x), \\ \text{TDS} &= 40x + m \cdot (1-x), \\ \text{Cl} &= 2.5x + p \cdot (1-x), \end{aligned} \quad (7)$$

где x – доля молодых вод; $(1-x)$ – доля старых вод; ${}^{14}\text{C}_{\text{Age}} = 8190 \pm 210$ лет; 0 – возраст молодых вод, лет; n – возраст старых вод, лет; TDS – общая минерализация молодых вод, $302.39 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; m – общая минерализация старых вод, концентрация хлоридов в молодых водах $\text{Cl} = 61 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; p – концентрация хлоридов в старых водах, $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$. TDS и Cl молодых вод приняты по пробе речной воды в паводок.

По (7) получаем возраст старых подземных вод в пробе из скважины водозабора Курья 12.9 ± 0.24 тысяч лет. Доля старых вод составляет от 79 до 53%, то есть ее исходная общая минерализация составляла $440 \pm 75 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а содержание хлоридов $91 \pm 17 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Такие воды могли перетекать из верхних частей нижележащего водоносного комплекса нижнемеловых алевролитов и песчаников.

По результатам анализа пробы одной из скважин водозабора Озерный возраст подземных вод составил 600 ± 70 лет, а активность трития 2.54 ± 1.27 ТЕ. Аналогичным образом по формуле (7) получаем по этой пробе возраст старых подземных вод 800 ± 90 лет. Доля старых вод составляет от 88 до 66%, то есть ее исходная общая минерализация составляла $125 \pm 20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а содержание хлоридов $3.24 \pm 0.11 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Такие воды могли перетекать только из нижних частей водоносного горизонта современных аллювиальных отложений.

Для возрастов подземных вод, опробованных в остальных скважинах, более представительны датировки по изотопам трития 20–50 лет.

Изотопы урана в подземных водах

Концентрации урана в подземных водах скважин, расположенных на удалении от реки, крайне низки: $0.014\text{--}0.101 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, в воде береговых скважин они значительно выше ($0.276\text{--}0.479 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$). Отношение активностей изотопов урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ несколько повышено по сравнению с равновесным значением в воде всех скважин: 1.04–2.18.

Для сравнения можно привести данные о концентрации урана в поверхностных водах реки Печоры ($0.2\text{--}0.5 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) и в атмосферных осадках на морском побережье ($0.02 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) [30, 31]. Отношение активностей изотопов урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ также несколько увеличивается в речной воде и атмосферных осадках: 1.14–1.75.

Эти данные подтверждают сказанное выше о преимущественном составе подземных вод в прибрежной зоне за счет подтягивания речных вод и питания подземных вод вдали от берега за счет атмосферных осадков.

Заключение

Для арктических регионов характерно широкое развитие многолетней мерзлоты. На основной площади подземные воды имеют крайне ограниченное распространение и приурочены к речным и озерным таликам небольшой мощности. Мы изучили используемый для водоснабжения водоносный горизонт песчаных отложений в долине реки Печоры в западной части российской Арктики.

Установлено, что подземные воды горизонта отличаются по условиям питания вблизи реки и на удалении от нее. Вода, извлекаемая береговыми скважинами, имеет состав, сходный с составом речных вод в зимнюю межень. Возраст подземных вод в береговых скважинах составил по содержанию изотопа трития и гидродинамическим расчетам до 20–25 лет, на основании чего был сделан

вывод о практически полном замещении подземных вод, поступивших в водоносный горизонт до 1995–2000 гг.

В подземных водах скважин, удаленных от берега реки, содержания всех компонентов ионного состава существенно ниже, чем в речных водах. Расчеты по изотопам трития и балансовые расчеты показали, что возраст воды в пробах, отобранных из скважин, удаленных от берега реки, находится в интервале от 20 до 50 лет. Однако в отличие от вод береговых скважин, в этих подземных водах присутствует «бомбовая» вода и старая вода, поступавшая в водоносный горизонт до 1952 г., что, впрочем, на ее качестве не отражается.

Радиоуглеродное датирование позволило оценить возраст наиболее старых подземных вод в скважинах области исследования: 8190 ± 210 лет. Расчеты по моделям смешения с использованием изотопов трития и гидрохимических данных показали, что в составе этих вод присутствует от 79 до 53% еще более старых вод с возрастом 12.9 ± 0.24 тысяч лет. Их исходная минерализация составляла 440 ± 75 мг·л⁻¹, а содержание хлоридов 91 ± 17 мг·л⁻¹. Такие воды могли перетекать из верхних частей нижележащего водоносного комплекса нижнемеловых алевролитов и песчаников.

Установлено, что с уменьшением возраста подземных вод величина $\delta^{13}\text{C}$ уменьшается, а $^{14}\text{C}^0$ увеличивается. Это может свидетельствовать о процессе повышения углеродного обмена между РНУ и почвенным CO_2 , вызванном оттаиванием многолетней мерзлоты.

Концентрации урана в подземных водах скважин, расположенных на удалении от реки, крайне низки: 0.014–0.101 мкг·л⁻¹, а в воде береговых скважин они значительно выше (0.276–0.479 мкг·л⁻¹). Эти данные подтверждают формирование состава подземных вод в прибрежной зоне в основном за счет подтягивания речных вод и питание подземных вод вдали от берега за счет атмосферных осадков.

Таким образом, использование информации о распределении изотопов трития в подземных водах таликового водоносного горизонта в Арктике позволило уточнить условия питания подземных вод и соотношения концевых элементов молодых вод, «бомбовых вод» и старых вод в разных частях водоносного горизонта. В связи с интенсивной добычей углеводородов в бассейне реки Печора необходимо контролировать состав речных вод, так как речные воды играют ведущую роль в составе подземных вод, используемых для питьевого водоснабжения населенных пунктов в исследуемом арктическом регионе.

Литература

1. L. Eichelberger
World. Develop., 2019, **16**, 100148.
DOI: 10.1016/j.wdp.2019.100148.
2. J. Okkonen, B. Kløve
J. Hydrol., 2011, **411**(1–2), 91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.038.
3. M.I. Jyrkama, J.F. Sykes
J. Hydrol., 2007, **338**(3–4), 237.
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.02.036.
4. J. Scibek, D.M. Allen, A.J. Cannon, P.H. Whitfield
J. Hydrol., 2007, **333**(2–4), 165.
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.08.005.
5. M. Nygren, M. Giese, B. Kløve, E. Haaf, P.M. Rossi, R. Barthel
J. Hydrol. X, 2020, **8**, 100062. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100062.
6. M. Brubaker, J. Berner, R. Chavan, J. Warren
Glob. Health. Action., 2011, **4**(1), 8445.
DOI: 10.3402/gha.v4i0.8445.
7. B. Kløve, P. Ala-Aho, G. Bertrand, J.J. Gurdak, H. Kupfersberger, J. Kværner, T. Muotka, H. Mykrä, E. Preda, P. Rossi, C.B. Uvo, E. Velasco, M. Pulido-Velazquez
J. Hydrol., 2014, **518**(PB), 250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.
8. Н.А. Айбулатов
Экологическое эхо холодной войны в морях Российской Арктики, РФ, Москва, ГЕОС, 2000, 306 с.
9. А.П. Васильев, Б.К. Водолога, Н.П. Волошин
Бюллетень по атомной энергии, 2005, №4, 20.
(http://elib.biblioatom.ru/text/byulleten-atomnoy-energii_2005_v4/go,18/).
10. A.Yu. Miroshnikov, N.P. Laverov, R.A. Chernov, A.V. Kudikov, A.A. Yasacheva, I.N. Semenov, R.A. Aliev, E.E. Asadulin, M.V. Gavrilov
Oceanology, 2017, **57**, 204.
DOI: 10.1134/S000143701701009X.
11. G.G. Matishov, N.E. Kasatkina, I.S. Usyagina
Dokl. Earth. Sc., 2019, **485**, 288.
DOI: 10.1134/S1028334X19030073.
12. Современная радиоэкологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации, под ред. В.А. Логачева, РФ, Москва, ИздАТ, 2005, 256 с.
13. J.A. Corcho Alvarado, R. Purtschert, F. Barbécot, C. Chabault, J. Rueedi, V. Schneider, W. Aeschbach-Hertig, R. Kipfer, H.H. Loosli
Water Resour. Res., 2007, **43**, W03427.
DOI: 10.1029/2006WR005096.
14. M. Kralik
Procedia Earth and Planetary Science, 2015, **13**, 301.
DOI: 10.1016/j.proeps.2015.07.070.
15. A.I. Malov
Sci. Total. Environ., 2018, **616–617**, 1208.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.197.

16. **В.В. Романов, В.И. Ферронский, С.М. Вакуловский, И.Ю. Катрич, Е.И. Рослый**
Водные ресурсы, 1983, №3, 109.
17. **В.И. Ферронский, В.А. Поляков**
Изотопия гидросферы Земли, РФ, Москва, Научный мир, 2009, 632 с.
18. **E. Fourré, F. Jean-Baptiste, A. Dapoigny, D. Baumier, J-R Petit, J. Jouzel**
Earth Planet Sci. Lett., 2006, **245**(1–2), 56.
DOI: 10.1016/j.epsl.2006.03.003.
19. **E. Fourré, A. Landais, A. Cauquoin, F. Jean-Baptiste, V. Lipenkov, J.-R. Petit**
J. Geophys. Res., 2018, **123**, 3009. DOI: 10.1002/2018JD028304.
20. **М.Я. Чеботина, О.А. Николай**
Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе, РФ, Екатеринбург, УрО РАН, 2005, 89 с.
21. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)*, РФ, Москва, Минздрав России, 1999, 115 с.
22. **В.М. Шершаков, В.Г. Булаков, И.И. Крышев, С.М. Вакуловский, М.Н. Каткова, А.И. Крышев**
Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2019 году, РФ, Обнинск, ФГБУ «НПО «Тайфун», 2020, 340 с. (https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/187/ezhegodnik_ro_2019.pdf).
23. **K.O. Münnich**
Naturwissenschaften, 1957, **44**, 32.
24. **K.O. Münnich**
Naturwissenschaften, 1968, **55**, 11.
25. **L-F. Han, L.N. Plummer**
Earth-Sci. Rev., 2016, **152**, 119.
DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.11.004.
26. **M. Stuiver, P.J. Reimer, R. Reimer**
CALIB Radiocarbon Calibration Ex. Ver. 8.2.
(<http://calib.org/calib/>).
27. **L-F. Han, L.N. Plummer, P. Aggarwal**
Chem. Geol., 2014, **387**, 111. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.08.026.
28. **A.I. Malov**
Isotopes Environ. Health Stud., 2018, **54**(1), 78.
DOI: 10.1080/10256016.2017.1342641.
29. **Е.Л. Минкин**
Гидрогеологические расчеты для определения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод, СССР, Москва, Недра, 1967, 124 с.
30. **А.И. Малов, г.П. Киселев**
Уран в подземных водах Мезенской синеклизы, РФ, Екатеринбург, УрО РАН, 2008, 237 с.
31. **Н.Г. Рачкова, И.И. Шуктомова**
АНРИ, 2010, №2, 44.

[illegible]

Isotope-Geochemical Studies of Groundwater in the Zapolyarny Region of the Nenets Autonomous Okrug*

Alexander I. Malov

Director of the F. Yudakhin Institute of
Geodynamics and Geology
N. Laverov Federal Center for Integrated
Arctic Research, UrB RAS
23 Northern Dvina Emb.,
Arkhangelsk, 163000, Russia
malovai@vandex.ru

Abstract

The aquifer of sandy deposits in the talik zone of the Pechora River valley was studied. The use of information on the distribution of tritium isotopes made it possible to clarify the recharge conditions of groundwater and their genetic structure in different parts of the aquifer. The tritium age of groundwater in coastal wells was 20–25 years, on the basis of which it was concluded that the groundwater that entered the aquifer before 1995–2000 was almost completely replaced. In wells, remote from the river bank, the age of the water is in the range from 20 to 50 years. However, unlike onshore wells, these groundwaters contain “bomb” water and old water that entered the aquifer before 1952. The age of the old water reaches 12.9 ± 2.5 thousand years. It has been established that the ratio between stable ^{13}C and radioactive ^{14}C isotopes of carbon changes with age, indicating an increase in the carbon exchange between dissolved inorganic carbon and soil carbon dioxide caused by permafrost thawing.

Keywords: groundwater, dating, tritium, carbon isotopes, uranium isotopes, Arctic.

**The work was financially supported by RFBR (project 20-05-00045).*

Images & Tables

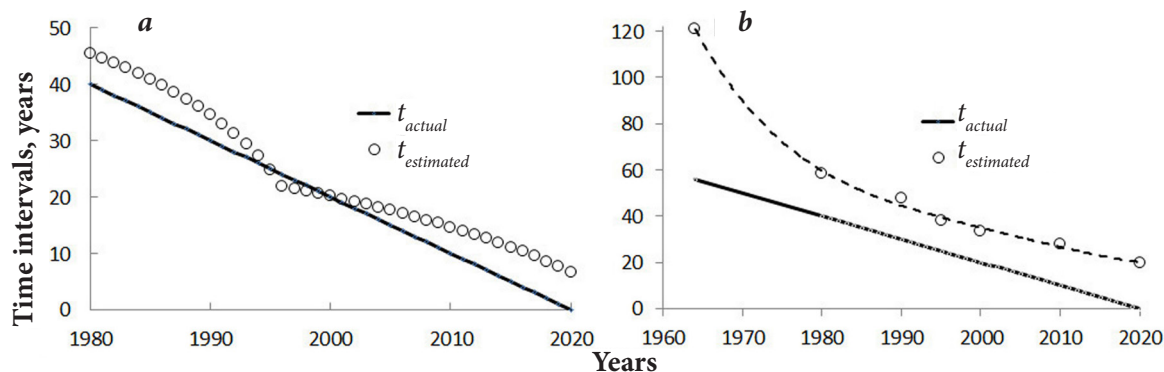


Fig. 1. Scheme for determining the age of groundwater by the ^3H isotope. t_{actual} – The time interval from the moment tritium enters the aquifer with a concentration until the moment of groundwater sampling in July 2020; $t_{\text{estimated}}$ is the time interval required for the decay of tritium with a concentration up to the average concentrations obtained in July 2020: a – in samples from three coastal wells – 7.28 TU; b – in samples from other wells located at a distance from the river bank – 3.47 TU.

References

1. L. Eichelberger
World. Develop., 2019, **16**, 100148.
DOI: 10.1016/j.wdp.2019.100148.
2. J. Okkonen, B. Klove
J. Hydrol., 2011, **411**(1–2), 91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.038.
3. M.I. Jyrkama, J.F. Sykes
J. Hydrol., 2007, **338**(3–4), 237.
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.02.036.
4. J. Scibek, D.M. Allen, A.J. Cannon, P.H. Whitfield
J. Hydrol., 2007, **333**(2–4), 165.
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.08.005.
5. M. Nygren, M. Giese, B. Klove, E. Haaf, P.M. Rossi, R. Barthel
J. Hydrol. X, 2020, **8**, 100062.
DOI: 10.1016/j.jhydroa.2020.100062.
6. M. Brubaker, J. Berner, R. Chavan, J. Warren
Glob. Health. Action., 2011, **4**(1), 8445.
DOI: 10.3402/gha.v4i0.8445.
7. B. Klove, P. Ala-Aho, G. Bertrand, J.J. Gurdak, H. Kupfersberger, J. Kværner, T. Muotka, H. Mykrä, E. Preda, P. Rossi, C. B. Uvo, E. Velasco, M. Pulido-Velazquez
J. Hydrol., 2014, **518**(PB), 250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.
8. N.A. Aibulatov
Ecological Echoes of the Cold War in the Seas of the Russian Arctic [Ekologicheskoe ekho kholodnoy voyny v moryakh Rossiyskoy Arktiki], RF, Moscow, GEOS, 2000, 306 pp. (in Russian).
9. A.P. Vasilev, B.K. Vodolaga, N.P. Voloshin
Byulleten po atomnoy energii [Atomic Energy Bulletin], 2005, №4, 20 (in Russian).
(http://elbib.biblioatom.ru/text/byulleten-atomnoy-energii_2005_v4/go,18/).
10. A.Yu. Miroshnikov, N.P. Laverov, R.A. Chernov, A.V. Kudikov, A.A. Yasacheva, I.N. Semenov, R.A. Aliev, E.E. Asadulin, M.V. Gavrilov
Oceanology, 2017, **57**, 204. DOI: 10.1134/S000143701701009X.
11. G.G. Matishov, N.E. Kasatkina, I.S. Usyagina
Dokl. Earth. Sc., 2019, **485**, 288.
DOI: 10.1134/S1028334X19030073.
12. Modern Radioecological Situation at the Sites of Peaceful Nuclear Explosions on the Territory of the Russian Federation [Sovremennaya radioekologicheskaya obstanovka v mestakh provedeniya mirnykh yadernykh vzryvov na territorii Rossiyskoy Federatsii], Ed. V.A. Logachev, RF, Moscow, Izdat Publ., 2005, 256 pp. (in Russian).
13. J.A. Corcho Alvarado, R. Purtschert, F. Barbécot, C. Chabault, J. Rueedi, V. Schneider, W. Aeschbach-Hertig, R. Kipfer, H.H. Loosli
Water Resour. Res., 2007, **43**, W03427.
DOI: 10.1029/2006WR005096.
14. M. Kralik
Procedia Earth and Planetary Science, 2015, **13**, 301.
DOI: 10.1016/j.proeps.2015.07.070.
15. A.I. Malov
Sci. Total. Environ., 2018, **616–617**, 1208.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.197.
16. V.V. Romanov, V.I. Ferronsky, S.M. Vakulovsky, I.Yu. Katrich, E.I. Rosly
Vodnye resursy [Water Resources], 1983, №3, 109 (in Russian).
17. V.I. Ferronsky, V.A. Polyakov
Isotopes of the Earth's Hydrosphere, FRG, Dordrecht-Heidelberg, Springer, 2012, 628 pp.
DOI: 10.1007/978-94-007-2856-1.
18. E. Fourré, F. Jean-Baptiste, A. Dapoigny, D. Baumier, J-R Petit, J. Jouzel
Earth Planet Sci. Lett., 2006, **245**(1–2), 56.
DOI: 10.1016/j.epsl.2006.03.003.
19. E. Fourré, A. Landais, A. Cauquoin, F. Jean-Baptiste, V. Lipenkov, J.-R. Petit
J. Geophys. Res., 2018, **123**, 3009.
DOI: 10.1002/2018JD028304.
20. M.Ya. Chebotina, O.A. Nikolin
Radioecological Studies of Tritium in the Ural Region [Radioekologicheskie issledovaniya tritiya v Uralskom regione], RF, Ekaterinburg, UrB RAS Publ., 2005, 89 pp. (in Russian).
21. Radiation Safety Standards (NRB-99) [Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99)], RF, Moscow, Ministry of Health of Russia, 1999, 115 pp. (in Russian).
22. V.M. Shershakov, V.G. Bulgakov, I.I. Kryshev, S.M. Vakulovsky, M.N. Katkova, A.I. Kryshev
Radiation Situation in Russia and Neighboring States in 2019 [Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2019 godu], RF, Obninsk, FGBU "NPO" Typhoon Publ., 2020, 340 pp. (in Russian). https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/187/ezhegodnik_ro_2019.pdf
23. K.O. Mümmich
Naturwissenschaften, 1957, **44**, 32.
24. K.O. Mümmich
Naturwissenschaften, 1968, **55**, 11.
25. L-F. Han, L.N. Plummer
Earth-Sci. Rev., 2016, **152**, 119.
DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.11.004.
26. M. Stuiver, P.J. Reimer, R. Reimer
CALIB Radiocarbon Calibration Ex. Ver. 8.2. (<http://calib.org/calib/>).
27. L-F. Han, L.N. Plummer, P. Aggarwal
Chem. Geol., 2014, **387**, 111. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.08.026.

28. **A.I. Malov**
Isotopes Environ. Health Stud., 2018, **54**(1), 78.
DOI: 10.1080/10256016.2017.1342641.
29. **E.L. Minkin**
Hydrogeological Calculations for Determining the Zones of Sanitary Protection of Groundwater Intakes [Gidrogeologicheskie raschety dlya opredelenia zon sanitarnoy okhrany vodozaborov podzemnykh vod], USSR, Moscow, Nedra, 1967, 124 pp. (in Russian).
30. **A.I. Malov, G.P. Kiselev**
Uranium in the Underground Waters of the Mezen Syncline [Uran v podzemnykh vodakh Mezenskoy sineklizy], RF, Ekaterinburg, UrB RAS, 2008, 237 pp. (in Russian).
31. **N.G. Rachkova, I.I. Shuktomova**
ANRI [Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy], 2010, №2, 44 (in Russian).

Зоны интенсивного природопользования в российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе*

*В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров, Е.А. Боровичев, Е.М. Ключникова, Л.Г. Исаева, Л.А. Рябова, Д.Б. Денисов,
А.В. Светлов, Е.А. Красавцева, В.В. Максимова, С.И. Мазухина, Т.А. Сухарева, В.В. Еришов, Н.Е. Королева,
Л.В. Иванова, А.В. Лосев*

В статье представлены результаты исследований, выполненных по трем направлениям (блокам).

Блок 1. Исследованы наземные экосистемы в районах интенсивного природопользования. Климатические изменения и антропогенное воздействие приводят к трансформации ландшафтов с нарушенным или полностью уничтоженным растительным покровом. В пресноводных экосистемах выявлены кардинальные



МАСЛОБОВ
Владимир Алексеевич
Федеральный
исследовательский центр
Кольский научный центр РАН



МАКАРОВ
Дмитрий Викторович
Директор Института проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



БОРОВИЧЕВ
Евгений Александрович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



КЛЮЧНИКОВА
Елена Михайловна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



ИСАЕВА
Людмила Георгиевна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



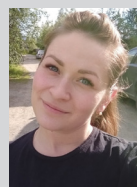
РЯБОВА
Лариса Александровна
Институт экономических
проблем им. г.П. Лузина,
Кольский научный центр РАН



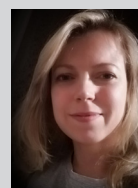
ДЕНИСОВ
Дмитрий Борисович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



СВЕТЛОВ
Антон Викторович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



КРАСАВЦЕВА
Евгения Андреевна
Федеральный
исследовательский центр
Кольский научный центр РАН



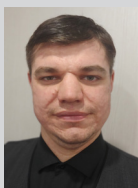
МАКСИМОВА
Виктория Вячеславовна
Федеральный
исследовательский центр
Кольский научный центр РАН



МАЗУХИНА
Светлана Ивановна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



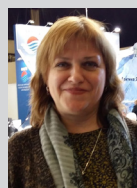
СУХАРЕВА
Татьяна Алексеевна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



ЕРИШОВ
Вячеслав Вячеславович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



КОРОЛЕВА
Наталья Евгеньевна
Полярно-альпийский
ботанический сад-институт
им. Н.А. Аврорина Кольского
научного центра РАН



ИВАНОВА
Людмила Викторовна
Институт экономических
проблем им. г.П. Лузина
Кольского научного центра РАН



ЛОСЕВ
Александр Вячеславович
Полярный геофизический
институт РАН

перестройки в структурно-функциональной организации от многофакторной антропогенной нагрузки на фоне потепления климата. Получены уникальные данные о долговременной динамике биоразнообразия водных экосистем.

Блок 2. Изучены свойства хвостов обогащения, оценено влияние продолжительности сезона пыления и изменения влажности на валовый выброс пыли, изучено взаимодействие хвостов с почвенными водами. Показана потенциальная экологическая опасность попадания минеральных частиц хвостов в почву. Выполнена оценка потерь цветных металлов в период хранения отходов при различных сценариях изменения климата.

Блок 3. Изучены представления населения об изменениях климата и их социальных последствиях. Выявлено, что проблема изменения климата четко коррелирует с экологическими проблемами. Изучено влияние пандемии COVID-19 на Арктику с учетом изменений климата. Пандемия высветила неустойчивость вахтового метода освоения ресурсов, вахтовые поселки стали очагами эпидемиологической опасности.

Ключевые слова: зоны интенсивного природопользования, Арктика, стратегии адаптации, отходы горно-промышленного комплекса, устойчивое развитие.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60142).*

Введение

Стратегические задачи освоения ресурсов российской Арктики диктуют необходимость проведения политики, учитывающей последствия изменения природной среды в этом макрорегионе. В связи с этим возрастает актуальность оценки последствий естественных и антропогенных воздействий, в том числе изменений климата, на природную среду и социально-экономические процессы в зонах интенсивного природопользования в Арктике – регионах и населенных пунктах, где идет активная промышленная ресурсодобывающая деятельность.

Важность исследования определяется, с одной стороны, необходимостью поиска новых методов комплексной оценки природных и антропогенных воздействий, включая изменения климата, в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике, а с другой – высокой практической актуальностью разработки научных рекомендаций по формированию превентивных мер и стратегий адаптации к природным и антропогенным воздействиям, в том числе изменениям климата, в арктических промышленных городах.

Отличительной чертой проекта, определяющей его научную новизну, является междисциплинарность. Его реализация осуществлялась на стыке биологии, промышленной экологии, региональной экономики, социологии и североведения. В качестве кейса выбрана Мурманская область – регион наиболее интенсивного природопользования в Арктике. В фокусе исследования были процессы, идущие в наземных экосистемах и отходах горно-металлургического комплекса в районах воздействия крупных предприятий – АО «Кольская горно-металлургическая компания», АО «Апатит» и др., а также социально-экономические процессы в моногородах об-

ласти в их взаимосвязи с текущими и ожидаемыми изменениями климата. Одним из важнейших ожидаемых результатов стала разработка пакета рекомендаций по планированию превентивных мер и формированию адаптационных стратегий к меняющимся природным условиям, в том числе климатическим, как на региональном, так и на муниципальном уровне.

Цель проекта – комплексная междисциплинарная оценка природного и антропогенного воздействия на природную среду в условиях изменения климата и социальные процессы в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике и обоснование научных рекомендаций по разработке превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата в арктических промышленных городах.

В соответствии с поставленной целью и вытекающими из нее задачами исследований были выделены три основные взаимосвязанные направления (блока):

Блок 1. Влияние природных и антропогенных факторов в условиях изменения климата в Арктике: наблюдаемые и ожидаемые последствия для окружающей среды и биоразнообразия в зонах интенсивного природопользования, включая изменения в наземных и водных экосистемах.

Блок 2. Оценка степени влияния изменения климата в Арктике на процессы, происходящие в горно-рудной и горно-металлургической промышленности, техногенных месторождениях, отвалах и хвостохранилищах.

Блок 3. Социальные последствия изменений климата в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике (на примере промышленных городов Мурманской области).

Важнейшие результаты, полученные при реализации проекта

Блок 1. Выполнен анализ состава атмосферных выпадений, почв, почвенных вод и хвои деревьев в северо-таежных лесах Мурманской области, подверженных воздушному промышленному загрязнению выбросами комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» (АО «Кольская ГМК») [1–3]. Анализ содержания тяжелых металлов за более чем 20-летний период снижения выбросов показал, что в хвое сосны у деревьев разного возраста содержание никеля и меди снизилось в листопадных лесах и техногенном редколесье, а в хвое ели – в непосредственной близости от источника загрязнения, в техногенном редколесье. Состав атмосферных выпадений и почвенных вод, прошедших сквозь древесный полог, отличается высокими концентрациями и выпадениями элементов по сравнению с водами межкрупных пространств, что объясняется их смывом и выщелачиванием из крон деревьев. В еловых лесах концентрации и выпадения большинства элементов выше по сравнению с сосняками, что обусловлено большей поверхностью и наиболее выраженными барьерными функциями крон ели. В атмосферных выпадениях в листопадных лесах и техногенных редколесьях по сравнению с фоновой территорией наблюдается резкое и достоверное увеличение concentra-

ций основных поллютантов: меди и никеля – до 140 раз, сульфатов – до 7 раз, что наиболее ярко выражено в подкрупных пространствах. В фоновых ельниках и сосняках в дождевых водах обнаружено увеличение концентраций никеля в 2013–2017 гг. как в подкрупных, так и в межкрупных пространствах, что объясняется возрастанием содержания поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния.

Проведен сравнительный анализ уровней выпадений поллютантов из атмосферы на объектах исследований с установленным в международной практике критическим уровнем, с учетом меж- и внутрибиогеоценотического варьирования. Выпадения тяжелых металлов и сульфатов в атмосферных выпадениях под кронами деревьев превышали годовые критические уровни (до 4 раз) уже в фоновых условиях. Наиболее высокие превышения наблюдаются в листопадных лесах и техногенных редколесьях, максимальные превышения уровня критических нагрузок выпадений сульфатов – до 7 раз и тяжелых металлов – до 600 раз. Выявлены закономерности, связанные с видовыми различиями в поглощении элементов питания растениями, и реакция биоты на техногенное воздействие в зонах интенсивного природопользования Мурманской области. В элементном составе различных видов растений и лишайников выявлен ряд сходных изменений под воздействием на лесные экосистемы газовоздушных выбросов горно-металлургических предприятий (дисбаланс в содержании макро- и микроэлементов, аккумуляция поллютантов). Установлено, что накапливающиеся в листьях и плодах тяжелые металлы (Ni, Cu, Co, Cd, Pb) делают непригодными их использование в качестве пищевого и лекарственного сырья. Показано значительное пространственное варьирование химического состава растений и лишайников, которое определяется типом растительного сообщества, внутрибиогеоценотическим (парцеллярным) варьированием и степенью техногенной трансформации лесных экосистем. Проведена оценка состояния зеленых насаждений в зонах интенсивного природопользования в районе расположения комбинатов «Печенганикель» и «Североникель» (пгт. Никель и г. Мончегорск Мурманской области). Промышленными выбросами в различной степени повреждены почти все деревья и кустарники урбанизированных территорий. В зоне воздействия комбината «Печенганикель» сохраняется высокая степень техногенной нагрузки на урбанизированные территории и лесные экосистемы, что подтверждается негативными изменениями в химическом составе березы в разные периоды наблюдений (1991, 2000, 2004, 2019 гг.). Концентрации Ni и Cu в листьях березы пгт. Никель значительно превышают таковые в г.

Мончегорске. На городской территории содержание тяжелых металлов (ТМ) в ассимилирующих органах березы превышают не только значения регионального фона, но и уровни, выявленные в лесных экосистемах по градиенту атмосферного загрязнения от комбината «Печенганикель». Изучена растительность, ценофлора сосудистых растений и выполнен анализ территориальной охраны природы городских и антропогенно нарушенных территорий гг. Кировск, Апатиты, Полярные Зори. Выделены растительные сообщества. Преобладание в долготном спектре видов с циркум- и космополитным ареалами характеризует практически все ценофлоры антропогенных местообитаний умеренного климатического пояса. Группы видов с космополитным и широким интродукционным ареалом (большинство из них входят в европейские и американские списки интродуцированных и инвазивных видов, Global Register of Introduced and Invasive Species) составляют самую большую группу в городской флоре. Высокая доля травянистых многолетников сближает флоры городов с флорами пойменных и залежных лугов Мурманской обл. Около 20% от общего количества редких и исчезающих видов в Мурманской области зарегистрировано в Хибинах и на прихилибинской равнине, преимущественно в границах 11 особо охраняемых природных территорий (ООПТ) общей площадью 123 220 га. Некоторые редкие виды осваивают антропогенно преобразованные территории. Наиболее критичными для утраты биоразнообразия в Хибинских горах являются развитие горнодобывающей промышленности, вырубка лесов и лесные пожары. Площадь открытых карьеров, лишенных растительности отвалов, дорог и других сопутствующих нарушений составляет 5% от площади всего горного массива, что сопоставимо, например, с долей еловых лесов в Хибинах. Условием существования и развития промышленно освоенного региона является охрана природного компонента в виде крупной ООПТ, в противном случае происходит антропогенная трансформация даже его удаленных участков, снижение биоразнообразия и фрагментация ландшафта [4].

В водных экосистемах наибольшую опасность представляет массовое развитие цианопрокариот [5], особенно в водоемах питьевого назначения, а также явление «Didymo», деформирующее условия обитания в арктических реках, разрушающее нерестилища лососевых рек. Повсеместно отмечается снижение доли ценных промысловых видов рыб на фоне увеличения малоценных короткоциклового представителей ихтиофауны. Установлено, что одним из факторов устойчивости планктонных организмов к токсической нагрузке может быть достаточное количество биогенных элементов. Зарегистрированы базы данных об альгоценозах (№2018621734) и сообще-

ствах зоопланктона (№2020621361) Евро-Арктического региона.

Блок 2. Исследования были сфокусированы на проблеме переработки бедных руд и техногенных отходов геотехнологическими методами кучного и бактериального выщелачивания, включая объекты кучного выщелачивания цветных и благородных металлов в районах с арктическим и субарктическим климатом с отрицательными среднегодовыми температурами. Показаны возможности применения этих приемов при организации геотехнологической переработки сульфидных руд цветных металлов [6–9]. Впервые высказано предположение о возможности применения метода пассивного выщелачивания для переработки забалансовых медно-никелевых руд и техногенного сырья. Повышение среднегодовых и сезонных температур в районах арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), в частности, Мурманской области, увеличение количества осадков будет способствовать усилению негативного воздействия на окружающую среду техногенных объектов – отходов горнодобывающей промышленности. Вместе с тем, изменение климата окажет и положительное влияние на горную промышленность, связанное с повышением рентабельности гидрометаллургических технологий, например, кучного биовыщелачивания.

Исследованы инженерно-геологические свойства и вещественный состав хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд АО «Апатит». По литологической классификации хвосты поверхностных слоев могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам. По величине пористости хвосты соответствуют пескам в условиях естественного залегания (пористость 25–45%), пористость проб свежеуложенных хвостов соответствует глинистым грунтам в условиях естественного залегания (пористость 30–60%). Все исследованные пробы хвостов по плотно-

сти сложения относятся к рыхлым грунтам (коэффициент пористости 0.76–1.31). Минеральный и химический состав отобранных проб достаточно однороден. Преобладающим минералом хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд является нефелин, содержание которого составляет 52–65%, а также эгирин (18–22%), полевые шпаты (8–11%), вторичные минералы по нефелину – натролит, аннит, лепидомелан и либнерит (3–4%), апатит (2–3%), титанит (5–6%), магнетит, слюды. Усредненный химический состав проб хвостов, %: SiO_2 – 39.04; Al_2O_3 – 23.10; TiO_2 – 2.42; Na_2O – 11.94; K_2O – 5.00; Fe_2O_3 – 6.13; FeO – 3.20; CaO – 5.00; MgO – 1.09; P_2O_5 – 1.21; SO_3 – 0.15; потери при прокаливании – 1.10. Эффективная удельная активность природных радионуклидов исследованных проб находится в диапазоне значений $102 \pm 11 \div 238 \pm 18$ Бк/кг. По величине удельной активности природных радионуклидов в соответствии с НРБ-99/2009 пробы отнесены к строительным материалам I класса, которые могут использоваться без ограничений. Хвосты обогащения представляют интерес как техногенное месторождение – сырье для получения глинозема, поташа, соды, редкоземельных элементов. Из хвостов могут быть выделены также эгириновый, сфеновый и полевошпатовый концентраты, получены различные строительные материалы.

Исследован вещественный состав хвостов обогащения комплексных руд. (АО «Ковдорский ГОК»). Хвосты поверхностных слоев II поля отвала относятся к мелко- и среднезернистым пескам. Пористость проб хвостов составила от 25.5 до 42.7%, что соответствует песчаным грунтам в условиях естественного залегания. Коэффициент пористости проб хвостов варьировал в диапазоне 0.34–0.74. Большинство проб хвостов по плотности сложения соответствует грунтам средней плотности, две пробы – рыхлым грунтам. В соста-

ве хвостов обогащения комплексных руд основным минералом является оливин, содержание которого составляет 28–32%, в заметных количествах представлены полевые шпаты и эгирин, присутствуют также карбонаты (кальцит, доломит), слюды, апатит и магнетит. Усредненный химический состав проб хвостов, %: SiO_2 – 27.5; MgO – 19.2; CaO – 18.6; Fe_2O_3 – 6.9; Al_2O_3 – 3.4; Na_2O – 1.3; K_2O – 1.4; MnO – 0.2; TiO_2 – 0.4; P_2O_5 – 2.0; SO_3 – 0.5; CO_2 – 12.0; потери при прокаливании – 6.1. Эффективная удельная активность природных радионуклидов исследованных проб находится в диапазоне значений $83 \pm 8 \div 156 \pm 13$ Бк/кг. В соответствии с НРБ-99/2009 пробы отнесены к строительным материалам I класса, которые могут использоваться в строительстве без ограничений. Техногенный минеральный объект представляет интерес с точки зрения доизвлечения апатита и магнетита, хотя содержания этих минералов в составе хвостов существенно ниже, чем в хвостах I поля, а также в качестве сырья для получения различных строительных материалов, в частности, конструкционных и теплоизоляционных керамических.

По инженерно-геологическим характеристикам и вещественному составу хвосты обогащения как апатитнефелиновых, так и комплексных руд склонны к пылению. В этой связи прогнозируемое потепление климата на территории АЗРФ, в частности, в Мурманской области, и связанное с этими процессами увеличение продолжительности бесснежного периода и рост температур летних месяцев способствует повышению негативного воздействия объектов на атмосферу и гидросферу, что требует разработки новых способов безопасного хранения (пылеподавления) хвостов обогащения.

Выполнена оценка связи метеорологических параметров теплого периода и интенсивности пыления хвостов обогащения апатитнефелиновых руд за период 2001–2019 гг. Установлено, что наиболее часто превышение наблюдалось при среднесуточной температуре воздуха в интервале 10–15 °C, влажности 60–80% и скорости ветра 2–4 м/с. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что для превышения ПДК достаточно кратковременных порывов ветра в районе хвостохранилища. Наибольшее число случаев приходится на ветры северо-западного направления. Анализ метеорологических параметров теплого периода показал, что в последнее десятилетие наблюдается существенное, более чем на 2 °C, повышение среднемесячной температуры в мае. С этим связан более ранний сход снежного покрова и увеличение продолжительности потенциальной возможности пыления хвостов. В летние месяцы (за исключением июня) и в сентябре зафиксировано незначительное повышение среднемесячной температуры. Средние

скорости ветра и влажность за это период существенно не изменились. Сопоставление изменения влажности проб хвостов, отобранных на одной и той же площади, показало, что уже через 10–15 дней после схода снежного покрова при отсутствии атмосферных осадков даже в случае среднесуточной температуры ниже 5–8 °С возникает опасность пыления.

В статических условиях проведены эксперименты по мобилизации экологически опасных элементов из материала хвостов обогащения апатитонегелиновых и комплексных руд при различных температурах и взаимодействии с органическим веществом. В качестве источника водорастворимого органического вещества были использованы почвенные вытяжки с содержанием углерода $C_{\text{общ}}$ 50 и 100 мг/л. Температурный режим был выбран в соответствии со средними температурами весеннего и летнего периодов на Кольском полуострове. Хвосты апатитонегелиновых руд умеренно сильно обогащены Nb, Sr, Ti, V, умеренно обогащены Co, Cu, Mn, Ta и LREE. Хвосты комплексных руд сильно обогащены Co, умеренно сильно обогащены Cu, Ni, Sr, умеренно обогащены Mn, Nb. Установлено, что переход в подвижные формы экологически опасных элементов, как ТМ, так и РЗЭ, усиливает повышение температуры, увеличение внесенного органического вещества и снижение pH растворов. В зависимости от распределения форм существования элементов, внесенное органическое вещество может как снизить экологическую опасность хвостов обогащения, так и, наоборот, увеличить концентрацию поллютанта в жидкой фазе, повышая миграционную способность. Результаты исследований целесообразно учитывать при проведении рекультивационных работ на хвостохранилищах, так как для биологического этапа характерно увеличение содержания органического вещества и увеличение кислотности грунтов, что может приводить к изменению миграционной способности загрязнителей.

Исследованы гипергенные процессы, протекающие в отвалах Аллареченского месторождения, хвостах обогащения медно-никелевых руд и отвалах шлаков медно-никелевого производства в условиях различных температур и режимов увлажнения. Для физико-химического моделирования гипергенных процессов минералов шлаков применен программный комплекс «Селектор» [10, 11]. В лабораторных опытах образцы рудного материала массой 100 г помещали в коническую колбу, в которую заливали дистиллированную воду ($pH=5.9$). Отношение Т:Ж составляло 2:3. Эксперимент продолжали 160 суток при периодическом перемешивании раствора. Периодически измеряли pH раствора и концентрации никеля и меди. Установлено, что основными

катионами поровых растворов рассмотренных систем являются ионы магния, кальция, алюминия, никеля и меди, преобладающими анионами – сульфат-, гидросульфат- и гидрокарбонат-ионы. Концентрации ионов при температурах 3 и 20 °С отличаются незначительно. Результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о том, что модель корректно описывает протекающие изменения водородного показателя и ионного состава систем. Для ионов никеля установлено, что с усилением степени взаимодействия металл интенсивнее выщелачивается при более низкой температуре. Основными новообразованными фазами являются гетит, глинистые алюмосиликаты, алузит. При малых степенях взаимодействия фиксируется гиббсит, при увеличении степени взаимодействия и количества воды в системе образуются гипс, кремнезем, сульфаты никеля. Результаты моделирования показывают, что повышение среднесезонных температур, длительности безморозного периода приведет к интенсификации гипергенных процессов при хранении отходов горно-металлургического комплекса и увеличению негативного воздействия на компоненты окружающей среды прилегающих территорий [12–15].

Рассчитаны максимальный разовый и валовый выбросы пыли с поверхности хранилища отходов обогащения апатитонегелиновых руд за период май – сентябрь 2013–2018 гг. Установлено, что ежегодный выброс пыли с поверхности хвостохранилища АНОФ-2 варьировал от 2 805 до 4 026 т. Для расчета приземных концентраций пыли использована единая программа расчета загрязнения атмосферы УПРЗА «Эколог» (версия 4.60), разработанная компанией «Интеграл». В программе реализованы методики проведения оценки воздействия на окружающую среду, утвержденные Минприроды России. Скорость выброса пыли рассчитывали с помощью програм-

мы «Горные работы» версии 1.30.11 от 10.08.2019. Метеорологические данные были получены в ФГБУ «Мурманское УГМС». Для расчета также использованы данные метеорологических характеристик территории хвостохранилища (данные метеостанции Апатитовая, Россия, №22213 по классификации Всемирной метеорологической организации), информацию о текущей погоде с международного сервера обмена данными NOAA, США, в форматах SYNOP и METAR. Из полученного массива данных о метеорологических условиях в районе исследования выбирали дни без осадков; вели расчеты отдельно для каждого из ветровых диапазонов 5–7 м/с, 8–9 м/с, 10 м/с и более. С учетом того, что рассредоточенный намыв хвостовой пульпы производится по секторам и по окончании намыва участок закрепляют связующим реагентом, территория хвостохранилища была разделена на двенадцать условных участков, являющихся потенциальными источниками пылевыведения. Расчеты вели для одного условного участка площадью 210 000 м². Расчеты рассеивания показывают, что атмосферный ореол пылевого загрязнения хвостохранилища АНОФ-2 распространяется на десятки километров. При скорости ветра около 8 м/с концентрация взвешенных веществ на границе санитарно-защитной зоны предприятия многократно превышает ПДК, наблюдается превышение и в жилой зоне г. Апатиты – до 2.9 ПДК. Результаты моделирования согласуются с данными о случаях превышения ПДК взвешенных веществ в атмосферном воздухе в г. Апатиты, полученными от ФГБУ «Мурманское УГМС». Выполнена оценка возможного влияния изменений климатических условий региона на пыление хвостохранилища [16, 17]. На основе анализа и статистической обработки данных о метеорологических условиях был рассчитан прирост валового выброса пыли неорганической

20–70% SiO₂ при условии возможного потепления, схода снежного покрова и более раннего наступления периода пыления хвостов, изменения влажности материала верхних слоев хвостов. В среднем, метеорологические условия, благоприятствующие пылению хвостов (низкая влажность атмосферного воздуха, отсутствие осадков, скорость ветра более 5 м/с), суммарно наблюдались в течение 72 часов в месяц (выгруженные данные метеостанции Апатитовая №22213 содержат показатели за каждые 3 часа). Установлено, что при увеличении сезона пыления на неделю в зависимости от влажности хвостов можно ожидать увеличения поступления пыли с поверхности хвостохранилища в атмосферу на величину от 72 (при влажности хвостов 9–10%) до 358 т (при влажности 5–7%), а при увеличении на четыре недели – от 286 до 1 432 т. Таким образом, полученные результаты показывают, что пыль с поверхности хвостохранилища вносит значительный вклад в загрязнение окружающей среды. Влияние изменений климатических условий региона на пыление хвостохранилищ необходимо учитывать для разработки превентивных мер по пылеподавлению.

Применение бактериального кучного выщелачивания для отходов сульфидных медно-никелевых руд преследует две цели: снизить экологическую опасность хвостов длительного хранения и получить дополнительные объемы цветных металлов. Эксплуатация объектов кучного выщелачивания цветных и благородных металлов в районах с арктическим и субарктическим климатом, в том числе Мурманской области, сопряжена с большими техническими сложностями и экономическими затратами. Поэтому актуальной является проверка возможности применения метода пассивного выщелачивания для переработки некондиционных медно-никелевых руд и техногенного сырья. Способ подразумевает предварительную сернокислотную агломерацию материала в присутствии активаторов окисления сульфидов, сооружение рудного штабеля, его хранение в холодный период года и последующее выщелачивание в теплый период. Если показатели выщелачивания цветных металлов за сезон оказываются технологически и экономически приемлемы, то рентабельность процесса существенно увеличивается. В этой связи в лабораторных условиях выполнены исследования по агломерации, последующему хранению и выщелачиванию техногенного сырья, в качестве которого использованы хвосты обогащения медно-никелевых руд текущего производства.

В ходе эксперимента хвосты гранулировали с помощью экспериментального гранулятора ФЛ015-1К-02, использовали 20 или 30%-й раствор H₂SO₄, соотношение Т:Ж варьировали от 4:1 до 9:1. Полу-

ченные гранулы орошали 0.5%-м раствором серной кислоты, содержащим окислитель в количестве 2 г/л, соотношение гранул и окислителя составляло при этом 5:1. Изучались два окислителя – трехвалентное железо (Fe^{3+}) и нитрит-ион (NO_2^-). Образование нитрит-иона достигалось опосредованно путем добавления в раствор серной кислоты нитрита натрия. Использование нитрита натрия также подразумевает образование более реакционноспособной формы – азотистой кислоты. С целью определения возможности формирования рудного штабеля, длительного хранения в условиях отрицательных температур и последующего выщелачивания измеряли физические характеристики гранул после приготовления – предел прочности при сжатии и слеживаемость. После этого была проведена оценка влияния отрицательных температур на физические свойства гранул и кинетику извлечения металлов при выщелачивании. Одну часть гранул хранили в течение 180 суток при температуре $+19^\circ\text{C}$, другую – в морозильной камере при температуре -15°C . После хранения гранулы загружали в перколяторы и подвергали водному, а затем сернокислотному выщелачиванию. Масса загрузки рудного материала составляла 200 г. Режим водного выщелачивания: подача воды 1 раз в сутки, суточный объем воды 50 мл, время выщелачивания 20 суток. Режим сернокислотного выщелачивания: концентрация кислоты 1%, подача кислоты 1 раз в сутки, суточный объем кислоты 50 мл, время выщелачивания 20 суток. Процесс вели без оборота раствора. В ходе водного выщелачивания хвостов, гранулированных с использованием Fe^{3+} в качестве окислителя, в раствор извлечено 28.2% никеля и 0.3% меди. При последующем выщелачивании раствором серной кислоты извлечения металлов составили: никеля 27.9% и меди 4.5%. Таким образом, за 40 суток эксперимента суммарно извлечено 56.1% никеля и 4.8% меди. При использовании в качестве окислителя NO_2^- средняя концентрация металлов в растворе составила 79.3 мг/л никеля и 3.6 мг/л меди. В процессе водного выщелачивания гранул с использованием NO_2^- в продуктивный раствор извлечено 15.0% никеля и 1.4% меди, а при кислотном выщелачивании – 30.2% никеля и 9.0% меди. Итого суммарно извлечено 45.2% никеля и 10.0% меди. По окончании водного выщелачивания гранул, приготовленных с использованием Fe^{3+} в качестве окислителя и хранившихся при -15°C , в раствор извлечено 27.5% никеля и 3.4% меди. При выщелачивании раствором серной кислоты к концу эксперимента удалось извлечь 16.9% никеля и 5.5% меди. За 40 суток выщелачивания в раствор извлечено 44.4% никеля и 8.9% меди. В процессе водного выщелачивания гранул, приготовленных с исполь-

зованием NO_2^- и хранившихся при -15°C , в продуктивный раствор извлечено 38.5% никеля и 6.8% меди. В процессе последующего сернокислотного выщелачивания достигнуты извлечения: никеля 30.8% и 9.1% меди. Суммарно извлечено 69.3% никеля и 15.9% меди. Таким образом показано, что хранение гранулированного рудного материала в условиях отрицательной температуры не приводит к существенному снижению механических свойств гранул. Грануляция с использованием в качестве активатора окисления сульфидных минералов нитрит-ионов способствует более интенсивному извлечению металлов в продуктивный раствор при последующем выщелачивании.

Смоделировано прогнозируемое потепление климата и выполнена оценка того, как увеличение продолжительности теплого периода и повышение среднесуточных температур скажется на условиях процесса выщелачивания никеля и меди из некондиционных медно-никелевых руд. Для проведения лабораторных экспериментов по кучному биовыщелачиванию был использован психротолерантный железокисляющий штамм микроорганизмов ацидофилов – *Acidithiobacillus ferrivorans* NO-37, выделенный из подотвальной воды Аллареченского ТМ медно-никелевых руд. Характерной особенностью штамма является температурный диапазон окисления сульфидных минералов от 4 до 37°C , с оптимумом 20 – 30°C . Руду Аллареченского техногенного месторождения (ТМ) измельчали до крупности 5 ± 2 мм, после чего пробу массой 800 г загружали в стеклянные перколяторы и на протяжении 50 суток орошали бактериальным раствором, приготовленным с использованием минеральной питательной среды, содержащей соли азота и фосфора, с исходной численностью микроорганизмов около 10^8 кл/мл. Объем подаваемого раствора составил 200 мл. Продуктивный раствор разбавляли

на 2/3 свежим бактериальным раствором и снова подавали на верх рудного слоя, поддерживая значение pH на уровне 2.0 путем подкисления с использованием 2%-го раствора серной кислоты. Для установления влияния температуры окружающей среды на извлечение металлов кучное выщелачивание производили при различных температурах (5, 10, 15 и 20 °C) с использованием термостата. По концентрации металлов в жидкой фазе рассчитывали степень извлечения цветных металлов.

В ходе биовыщелачивания при температуре 20 °C средняя концентрация никеля в растворе составила 424.5 мг/л, меди – 97.1 мг/л. К окончанию эксперимента извлечено 15.9% никеля и 7.4% меди. При температуре 15 °C средняя концентрация металлов в растворе была несколько ниже по сравнению с предыдущим опытом: никель – 395.1 мг/л, медь – 68.3 мг/л. Извлечение никеля составило 14.2%, меди – 5.2%. Снижение температуры до 10 °C привело к уменьшению извлечения меди в раствор. Извлечение никеля практически не изменилось. Так, средняя концентрация никеля в растворе на протяжении эксперимента составила 393.9 мг/л, меди – 52.5 мг/л. Извлечение металлов к концу эксперимента составило: никель – 14.3%, медь – 4.1%. В процессе биовыщелачивания при температуре 5 °C концентрация никеля в продуктивных растворах составила в среднем 340.1 мг/л. Средняя концентрация меди в растворе была 39.1 мг/л, что существенно ниже по сравнению с экспериментами при более высоких температурах. К концу эксперимента из руды удалось извлечь 12.3% никеля и 3.1% меди. Таким образом, при снижении температуры окружающей среды процессы биовыщелачивания начинают протекать менее интенсивно, что проявлялось уже в первой половине экспериментов.

Были получены зависимости извлечений цветных металлов (%) от продолжительности процесса (t_1 ,

диапазон 1–50 суток) и температуры (t_2 , диапазон 5–20 °C):

$$\text{Извлечение никеля} = 1.7535 + 0.3944 \cdot t_1 - 0.0356 \cdot t_2 - 0.004 \cdot t_1^2 + 0.0038 \cdot t_1 \cdot t_2 + 0.0034 \cdot t_2^2,$$

$$\text{Извлечение меди} = 0.0042 + 0.1342 \cdot t_1 - 0.0318 \cdot t_2 - 0.0022 \cdot t_1^2 + 0.0047 \cdot t_1 \cdot t_2 + 0.0053 \cdot t_2^2.$$

Эти зависимости позволяют оценить прирост извлечений металлов в продуктивные растворы при увеличении продолжительности теплого периода и повышении среднесуточных температур. Так, средняя температура двух декад мая и июня в районе отвала Аллареченского месторождения составляет 8.02 °C. Извлечение в продуктивный раствор никеля за 50 суток в этот период составит 12.93%. При повышении температуры до 10 °C извлечение возрастет до 13.36%. Средняя температура двух декад июля и августа составляет 12.92 °C. Извлечение никеля при повышении температуры до 15 °C возрастет до 14.55%, а при 17 °C до 15.08%.

Хвостохранилище обогатительной фабрики АО «Кольская ГМК» в г. Заполярный Мурманской области эксплуатируется с 1965 г. по настоящее время, занимает площадь около 600 га и является одним из крупнейших техногенных объектов цветной металлургии России. Рудные минералы хвостов представлены сульфидами: пирротин, пентландит и халькопирит, а также магнетитом. Преобладающими нерудными минералами являются серпентины. Присутствуют также амфиболы, пироксены, тальк, хлориты, карбонаты. В процессе хранения хвостов вследствие гипергенных процессов происходит переход цветных металлов в растворимую форму и их элиминирование в нижние слои хвостохранилища, либо в окружающую среду. При этом часть металлов осаждаются химически активными нерудными минералами, в частности, серпентинами, хлоритами и карбонатами. При последующей переработке хвостов, в частности, с использованием флотации, цветные металлы в составе силикатов и карбонатов будут неизвлекаемыми. Была выполнена оценка потерь цветных металлов в период хранения отходов горно-металлургического комплекса в отвалах при различных сценариях изменения климата на примере хвостов обогащения медно-никелевых руд. Продолжительность бесснежного периода в районе расположения хвостохранилища в среднем составляет 153 суток. В расчетах принимали среднесуточное количество осадков за этот период, равное 1.7 мм. Учитывали средние концентрации никеля и меди в поровых растворах проб хвостов текущего производства, полученных фильтрацией дистиллированной воды в перколяторах. В результате расчетов было установлено, что потери ценных компонентов из поверхностного слоя хво-

стов за бесснежный сезон (май – сентябрь), в среднем составят: никеля – 54.14 т, меди – 11.60 т. Для оценки возможных последствий изменения климата результаты эксперимента были аппроксимированы на увеличение бесснежного периода на 1, 2, 3 и 4 недели. Также были рассмотрены варианты влияния изменения влажности – в расчетах варьировали количество выпадающих осадков ± 5 и 10%. Как видно, с увеличением продолжительности бесснежного периода потери цветных металлов за счет элиминирования в нижние слои хвостохранилища либо в окружающую среду закономерно возрастают. Так, потери никеля растут с 57.12 т при увеличении продолжительности бесснежного периода на 1 неделю до 64.62 т при увеличении на 4 недели, меди с 12.24 до 13.85 т соответственно. При уменьшении количества выпадающих осадков потери металлов снижаются. Так, при уменьшении количества осадков на 10% потери никеля составят 51.41 и 58.16 т, меди 11.02 и 12.46 т для 1 и 4 недель увеличения продолжительности бесснежного периода соответственно. Наоборот, увеличение количества осадков приведет к росту потерь. Например, при увеличении количества осадков на 10% потери никеля составят 62.83 и 71.08 т, меди 13.46 и 15.23 т для 1 и 4 недель. На основе произведенных расчетов можно сделать вывод о том, что увеличение длительности бесснежного периода и рост количества осадков в этот период будет способствовать более интенсивному выносу в нижние слои хвостохранилища и сопредельные среды цветных металлов, переходящих в растворенные формы.

Блок 3. Выполнено сравнительное исследование изученности в российском и зарубежном научном дискурсе проблемы социальных последствий изменения климата в Арктике [18]. Установлено, что в зарубежной научной литературе тема социальных последствий изменения климата в Арктике (результатов климатических колебаний, влияющих на благополучие населения) – одна из самых обсуждаемых. В российской науке приоритет отдается изучению самих климатических изменений и их биолого-экологических эффектов. Наибольшие пробелы в знаниях существуют в вопросах социальных последствий изменения климата для коренных и местных сообществ российской Арктики, влияния климатических изменений на социальные процессы в зонах интенсивного промышленного освоения, в том числе в промышленных городах АЗРФ, разработки мер по смягчению последствий и адаптации на местном и региональном уровне. Определены приоритетные направления отечественных научных исследований по изучению социальных последствий изменения климата в Арктике: сбор и анализ первичной инфор-

мации о наблюдаемых изменениях в арктических экосистемах и стратегиях адаптации местных жителей и коренного населения к этим изменениям, об изменениях в зонах интенсивного промышленного освоения, на промышленных предприятиях и в моногородах АЗРФ; разработка сценарных прогнозов будущих изменений с использованием местных знаний [19, 20].

Проведено исследование представлений населения об изменениях климата и их социальных последствиях в зонах интенсивного промышленного освоения в Арктике на примере Мурманской области на основе качественных методов (2018 г., метод глубинного интервью). Проведено 20 интервью по 50 вопросов с жителями промышленных городов, критерий отбора респондентов – проживание на Севере не менее 30 лет. Вопросы касались субъективного восприятия тенденций изменения климата на территории проживания; изменения биоразнообразия; практик природопользования, их возможной связи с изменениями климата и адаптации к изменившимся условиям; влияния климата на физическое и психическое здоровье; информированности в отношении проблемы изменения климата и ее осознанности; предполагаемых причин изменения климата и необходимых действий.

Выявлено, что субъективное восприятие климатических изменений жителями городов области в большинстве случаев соответствует объективным данным о температурных и других изменениях. Если в начале интервью большинство респондентов отрицали изменения климата и их влияние на условия жизни и личное благополучие, то в ходе интервью климатические изменения и их последствия осознавались и заинтересованно обсуждались. Опрошенными жителями отмечаются изменения климата на протяжении трех последних десятилетий. Часть наблюдений респондентов за изменениями кли-

мата и биологическими объектами совпадает с выводами ученых. Особое внимание населения привлекают изменения в водных экосистемах – ухудшение качества воды, уменьшение количества и снижение качества рыбы, что влияет на практики природопользования, характерные для населения городов, расположенных вблизи водоемов, в некоторых случаях делая невозможным лов рыбы в традиционных местах.

Многие из опрошенных отмечали появление новых болезней растений и вредителей, видов животных и растений, ранее не известных в регионе, и то, что это влияет на практики природопользования, в том числе на дачных участках. Научные данные подтверждают, что в последние десятилетия в Мурманской области фиксируется продвижение на север несвойственных насекомых, болезней растений. В связи с изменением климата появились два новых вида бабочек-пядениц, повреждающих леса. С начала 2000-х гг. увеличилась активность грибов – возбудителей болезней древесных и кустарниковых пород – ржавчины, антракноза и др. Респонденты ощущают изменения в сфере здоровья, связывая их с климатическими колебаниями. Высказывались мнения о том, что «сезоны сдвинулись» и увеличились периоды межсезонья, возросло число экстремальных погодных явлений, а сезонные заболевания стали носить более затяжной и тяжелый характер. Разрушений инфраструктуры из-за изменений климата (обрушения или повреждения зданий, дорог, энергетической инфраструктуры) в промышленных городах Мурманской области не отмечено. Выявлено, что адаптационные стратегии на личном уровне включают изменения в повседневных практиках (например, более легкая одежда в зимний период, выращивание новых видов культур на дачных участках). Большинство респондентов считают, что решения по формированию стратегий адаптации должны приниматься

согласованно на всех уровнях управления, включая муниципальный.

Исследовано, как изменение климата, его влияние и причины воспринимаются и интерпретируются населением и каким образом формируются общественные представления об изменении климата (2021 г., метод структурированного интервью). Опрошено 40 респондентов по категориям: ученые, студенты, журналисты. Данные категории выбраны как наиболее влияющие на общественные представления о проблеме.

Большинство респондентов (до 80%) уверены, что климат в Арктике, а именно в Мурманской области, становится мягче и теплее. Респонденты расценивают это как положительный фактор, повышающий качество жизни за Полярным кругом. Выявлено, что существует выраженная дифференциация по возрасту в вопросе об антропогенных причинах изменения климата. Молодые люди (моложе 30 лет) в большей степени уверены в том, что человеческая деятельность существенно влияет на климатическую систему. Исправить ситуацию можно, в первую очередь, решив проблему с отходами – как коммунальными, так и промышленными. Это показывает, что проблема изменения климата в представлениях людей четко коррелирует с экологическими проблемами, важнейшей из которых является недружественный к окружающей среде способ обращения с отходами. Большинство респондентам не доверяют СМИ в вопросах изменения климата, предпочитают научные статьи или же мнение известных неправительственных организаций. В вопросах доверия к информации от зарубежных и российских ученых большинство респондентов не делают разницы, обращая внимание лишь на логичность и доказательность приводимых аргументов. Подавляющее большинство респондентов затруднились ответить на вопрос о том, как изменение климата отражается на их жизни и экономике Мурманской области. К положительным моментам многие отнесли будущую возможность более интенсивного использования Северного морского пути (для экономики) и повышение комфортности проживания за Полярным кругом при росте средних температур (для себя лично). К негативным моментам отнесли учащение опасных погодных явлений (гололедицы, метели, резкий частый переход температуры через отметку «0 °C», засуха). Также было отмечено, что более поздние сроки установления снежного покрова в условиях наступления полярной ночи сильно уменьшают видимость на дорогах и возможность распознавания пешеходов без светоотражателей, что повышает риск аварий. Это необходимо учитывать при разработке стратегий адаптации к изменению климата.

Сделан вывод, что актуальность вопросов социальных последствий изменения климата для населения городов российской Арктики в зонах интенсивного промышленного освоения возрастает. Такие города чувствительны к изменениям климата. В них плотность населения и инфраструктуры высока, и колебания температуры вместе с экстремальными погодными явлениями сильно влияют на качество воздуха и воды, здоровье и другие составляющие благополучия людей.

Проведены исследования и ряд научно-практических семинаров по созданию сценариев будущего развития регионов российской Арктики в условиях изменения климата, учитывающих знания различных групп местных и внешних экспертов.

Организован междисциплинарный исследовательский семинар «Сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных неопределенностей и изменений климата» (12 декабря 2018 г. в г. Апатиты на базе Кольского научного центра РАН, 32 участника – представителя различных научных дисциплин). Сделаны тематические доклады, определены основные движущие силы будущих изменений и разработаны четыре оригинальных сценария развития одного из регионов российской Арктики в условиях изменения климата на период до 2050 г.

Важным результатом явилось расширение опыта междисциплинарного взаимодействия ученых из различных областей науки (экологов, биологов, экономистов, математиков, медиков и др.) на площадке Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Также был организован семинар «Будущее народа саами в условиях глобальных изменений» (1–4 ноября 2019 г. в г. Апатиты на базе Кольского научного центра РАН, 52 участника из Апатитов, Ловозера, Мончегорска, Ёны, Оленегорска, Ковдора, Мурманска, Санкт-Петербурга и Москвы) с участием представителей народа саами (более 30 человек, что составило около 70% участников). В ходе обсуждений на семинаре была собрана информация об основных проблемах коренных малочисленных народов Севера, проживающих в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике, о факторах, которые представители саамского народа считают главными для обеспечения благополучия своего народа в условиях изменения климата, и практиках адаптации. Также были разработаны сценарии будущего Мурманской области до 2025 г., основанные на знаниях представителей саамского сообщества.

Было выявлено, что наиболее важным фактором благополучия своего народа в условиях меняющегося климата саами считают взаимодействие с регио-

нальной властью в целях справедливого расширения прав коренных малочисленных народов на пользование природными ресурсами. Большая часть саами в Мурманской области живет в сельской местности (около 70%) и использует для обеспечения жизнедеятельности различные виды традиционного хозяйствования, сохраняя сильную зависимость от состояния окружающей природной среды.

Вторым по важности фактором, влияющим на благополучие коренных народов в Арктике, была названа экологическая политика. Природа является для саами непреложной ценностью, и любое загрязнение, любые ущербы и изменения, в том числе климатические, подвергающие угрозе окружающую среду, воспринимаются саами как фактор, негативно влияющий на будущее этого народа и территории, на которой он проживает.

Замыкает тройку главных факторов, оказывающих значительное влияние на будущее саами как коренного народа Севера, развитие человеческого потенциала. Саами под развитием человеческого потенциала понимают прежде всего повышение качества образования человека и доступности качественной медицины. Кроме того, существенный вклад в человеческий потенциал вносит знание и использование традиционных знаний и традиционной культуры в профессиональной и частной жизни. Такой фактор, как миграционный отток, являющийся значимым для большей части населения Мурманской области, для саами не является значимым. Они не видят угрозы будущему развитию региона даже при массовом оттоке населения из области.

В ходе исследовательской сессии по сценарному прогнозированию развития Мурманской области в условиях изменения климата «Будущее народа саами в условиях глобальных изменений» был создан набор сценариев развития области до 2050

года. Было выявлено, что наиболее желательным для представителей саамского сообщества является сценарий, обеспечивающий устойчивое неразрушающее развитие региона, сохранение коренных народов и их традиционной культуры и практик жизнедеятельности, успешную адаптацию к изменениям климата.

Важным обобщающим итогом работы по созданию сценариев будущего развития регионов российской Арктики в условиях изменения климата, учитывающих знания различных групп экспертов, стала публикация двух монографий [21, 22].

В первый же месяц пандемии COVID-19, в конце второго года реализации проекта, были начаты исследования по направлению «Прогнозирование влияния последствий глобальной пандемии COVID-19 на будущее развитие российской Арктики, учитывая аспекты, связанные с изменением климата». 15 апреля 2020 г. участники проекта выступили на заседании дискуссионного клуба Лаборатории устойчивого развития Проектного офиса развития Арктики (ЛУР ПОРА) на тему «Настоящее и будущее Мурманской области в эпоху возрастающей неопределенности (региональной и глобальной)». В условиях ограничений и самоизоляции заседание прошло в режиме видеоконференции. В качестве экспертов выступили биологи, экономисты, политологи, экологи, местные жители, представители коренных народов. Из 12 экспертов четверо являлись исполнителями проекта №18-05-60142 «Арктика», финансируемого РФФИ.

Эксперты отметили, что пандемия COVID-19 высветила неустойчивость вахтового метода освоения арктических ресурсов, поскольку во многих вахтовых поселках образовались обширные очаги заражения при отсутствии возможности эффективно проводить профилактические мероприятия и отсутствии медицинской инфраструктуры для оказания своевременной помощи. Были вы-

сказаны мнения, что практики вахтового освоения ресурсов Арктики должны быть пересмотрены.

Цифровая экономика показала свою жизнеспособность, данные практики приживаются и активно развиваются. В условиях изменения климата их роль будет возрастать. Большие изменения произойдут в сфере малого бизнеса, услуг, здравоохранения. Туризм претерпит драматические изменения: будут переориентированы туристические потоки, повышение эпидемиологической безопасности передвижения людей потребует введения специальной системы мер, мобильность населения станет более «защищенной». В самый острый период рекреационная нагрузка на арктические экосистемы снизится, а затем, по мере выхода из пандемии, усилится. По причине экономического спада часть разведанных месторождений в ближайшие годы разрабатываться не будет. Таким образом, давление человека на арктическую природу в целом может несколько снизиться. Это благоприятно отразится на состоянии природы, которая сможет адаптироваться к изменениям климата, не испытывая дополнительного антропогенного стресса. Однако данные изменения, скорее всего, не будут носить долгосрочного характера. Обсуждение показало исключительно высокую актуальность и научно-практическую востребованность дальнейших исследований в направлении исследования влияния глобальной пандемии COVID-19 на будущее развитие российской Арктики в условиях изменения климата.

Разработаны подходы и сформирован комплекс научно-практических рекомендаций по разработке превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата в зонах интенсивного промышленного освоения и промышленных городах российской Арктики.

На завершающем этапе проекта, в связи с утверждением в мае 2021 г. Министерством экономического развития Российской Федерации ряда важных документов – Методических рекомендаций по оценке климатических рисков, Методических рекомендаций по ранжированию адаптационных мероприятий по степени их приоритетности и др., особое внимание было уделено анализу новых законодательных документов, их оценке как методического инструмента для подготовки планов адаптации разного уровня и их учету в рекомендациях.

Сделан вывод, что в последние несколько лет в Российской Федерации был совершен прорыв в разработке нормативных законодательных документов федерального уровня по вопросам, связанным с изменением климата, и законодательно закреплён «арктический императив» в отношении разработки превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям

климата. Принятый в мае 2021 г. пакет нормативных документов является первым в России системным методическим инструментом для подготовки отраслевых, региональных и корпоративных планов адаптации и может быть успешно использован на территориях зон интенсивного промышленного освоения в российской Арктике.

В то же время необходима дальнейшая работа по усилению в российском климатическом законодательстве регионального и, особенно, местного подхода к разработке превентивных мер и стратегий адаптации, базирующегося на системах знаний местного населения, коренных народов. Правомерность данного вывода подтверждает тот факт, что в последних законодательных документах, например, в Методических рекомендациях по ранжированию адаптационных мероприятий по степени приоритетности и Методических рекомендациях по формированию отраслевых, региональных и корпоративных планов адаптации к изменениям климата, утвержденных 13 мая 2021 г., муниципальный уровень практически не рассматривается.

Заключение

С учетом результатов, полученных в ходе междисциплинарных исследований, сформулированы следующие основные рекомендации по разработке превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата в зонах интенсивного промышленного освоения и промышленных городах российской Арктики:

1. В области законодательства и реализации политики по предотвращению рисков и адаптации к изменениям климата:

- обеспечить на региональном уровне в арктических субъектах Российской Федерации полное выполнение решений, предусмотренных в нормативно-правовых документах федерального уровня, связанных с вопросами изменения климата и адаптации;
- в связи с высокой дифференциацией арктических территорий Российской Федерации по природно-климатическим, социально-экономическим и другим условиям ускорить разработку на региональном уровне нормативно-правовой базы по разработке превентивных мер и адаптации с учетом специфики различных территорий, в том числе внутри одного региона, с выделением зон интенсивного промышленного освоения;
- усилить внимание к разработке на муниципальном уровне нормативно-правовых документов по вопросам адаптации к изменениям климата, особенно в зонах интенсивного промышленного освоения в Арктике.

2. В институциональной сфере:

- развивать институциональный потенциал для поддержки или создания эффективных структур по адаптации к изменению климата в российской Арктике на национальном и региональном уровнях, в том числе путем укрепления существующих или создания новых органов для разработки превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата, а также создания межотраслевых/межсекторных структур (комиссии, рабочие группы) для обеспечения большей координации и взаимодействия, особенно в зонах интенсивного промышленного освоения в Арктике.

3. В области повышения информированности и наращивания информационного потенциала:

- разрабатывать меры по созданию системы непрерывного мониторинга изменений и адекватного реагирования на происходящие изменения. Система мониторинга должна быть широкоохватной и постоянно действующей, охватывать не только природные, но и социально-экономические процессы, обеспечивать информацию для прогнозирования их развития в среднесрочной и долгосрочной перспективе, предоставлять достоверную информацию для принятия управленческих решений;
- для мониторинга целесообразно задействовать методы гражданской науки (citizen science), подразумевающей привлечение к проведению научных исследований и ведению наблюдений добровольцев, не имеющих специального образования. В России гражданская наука находится в начальной фазе развития, и одним из перспективных направлений региональных и местных адаптационных стратегий в российской Арктике может стать организация работы «сети народно-

- го мониторинга» за последствиями изменения климата;
- обеспечить доступ к информации на уровне местных сообществ и широкой общественности с целью повышения уровня информированности в обществе. Разработать меры по наращиванию информационного потенциала для различных уровней и партнеров, чтобы обеспечить их актуальной информацией и результатами исследований, особенно в области социальных последствий изменения климата, а также использовать современные средства коммуникации для расширения аудитории.
4. В направлении усиления регионального и местного подходов к разработке превентивных мер и стратегий адаптации:
- продвигать региональный и особенно местный подход к разработке стратегий адаптации к изменению климата, базирующийся на системах знаний местного населения, коренных народов Севера, включая обмен данными и информацией, развитие методологии научных исследований и мониторинга по вопросам изменения климата, координацию мероприятий на местах;
 - наращивать кадровый потенциал на региональном и местном уровнях, развивая подготовку компетентных специалистов, владеющих знаниями в области изменения климата и адаптивных технологий;
 - развивать институциональный потенциал региональных и местных органов власти по вопросам адаптации к изменению климата на основе создания на региональном и муниципальном уровнях межсекторных комиссий, экспертных и рабочих групп, включающих представителей органов региональной и муниципальной власти, представителей промышленных компаний, коренных народов Севера и НКО, ученых.
- Основные положения разработанных рекомендаций были предложены для рассмотрения и учета в работе ряда экспертных групп и комиссий, в том числе в ходе экспертно-аналитического мероприятия Счетной палаты Российской Федерации на тему «Анализ деятельности органов государственной власти по обеспечению национальных интересов в сфере охраны окружающей среды и экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации в 2018–2020 годах и истекшем периоде 2021 года» (эксперты – Маслобоев В.А., Рябова Л.А.).
- По теме проекта опубликованы 58 научных работ, включая три монографии, семь статей, включенных в базу WoS, 14 статей, включенных в базу Scopus, 25 статей в журналах, включенных в перечень ВАК.

Литература

1. В.В. Еришов, Л.Г. Исаева, Т.А. Сухарева, г.П. Урбанавичюс, Е.А. Иванова, Е.А. Белова
Вестник Кольского научного центра РАН, 2021, 13(2), 34.
DOI: 10.37614/2307-5228.2021.13.2.004.
2. В.В. Еришов, Н.В. Лукина, М.А. Данилова, Л.Г. Исаева, Т.А. Сухарева, В.Е. Смирнов
Экология, 2020, №4, 265. DOI: 10.31857/S0367059720040058.
3. Т.А. Сухарева, В.В. Еришов, Л.Г. Исаева, М.А. Шкондин
Цветные металлы, 2020, №8, 33. DOI: 10.17580/tsm.2020.08.05.
4. Е.А. Боровичев, В.Н. Петров, О.В. Петрова, Н.Е. Королева
Арктика и Север, 2018, №32, 107.
DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.32.107.
5. A.N. Sharov, D.B. Denisov
B Lake Water: Properties and Uses (Case Studies of Hydrochemistry and Hydrobiology of Lakes in Northwest Russia), Ser. *Climate Change and its Causes, Effects and Prediction*, Eds L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, T.Y. Vorobyeva etc., USA, NY, New York, Nova Sci. Publ., Inc., 2021, pp. 153–191.
6. V.A. Masloboev, A.V. Svetlov, D.V. Makarov, S.G. Seleznev
Minerals, 2018, 8(10), 436. DOI: 10.3390/min8100436.6.
7. A.V. Svetlov, P.V. Pripachkin, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
J. Mining Sci., 2020, 56(2), 275. DOI: 10.1134/S1062739120026757.
8. Д.В. Макаров, Е.А. Боровичев, Е.М. Ключникова, В.В. Маслобоев
Вестник МГТУ, 2020, 23(1), 63.
DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-63-71 9.
9. В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров, Е.М. Ключникова
Устойчивое развитие горных территорий, 2021, 13(2), 188.
DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-188-200.
10. К.В. Чудненко
Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение приложения, РФ, Новосибирск, Академ. изд. «Гео», 2010, 287 с.
11. С.И. Мазухина, В.В. Максимова, К.В. Чудненко, В.А. Маслобоев, С.С. Сандимиров, С.В. Дроздобужская, П.С. Терещенко, В.И. Пожиленко, А. В. Гудков
Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека, РФ, Апатиты, Изд. Кольского научного центра РАН, 2020, 158 с.
DOI: 10.37614/978.5.91137.437.2.
12. С.И. Мазухина, В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров
Химия в интересах устойчивого развития, 2021, 29(1), 69.
DOI: 10.15372/KhUR2021279.

13. **E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov, E. Potorochin**
Minerals, 2021, **11**(10), 1077.
DOI: 10.3390/min11101077.
14. **E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov**
Toxics, 2021, **9**(7), 163.
DOI: 10.3390/toxics9070163.
15. **S. Mazukhina, E. Krasavtseva, D. Makarov, V. Maksimova**
Minerals, 2021, **11**(9), 996. DOI: 10.3390/min11090996.
16. **O.V. Suvorova, E.A. Selivanova, J.A. Mikhailova, V.A. Masloboev, D.V. Makarov**
Appl. Sci. (Switzerland), 2020, **10**(10), 3515.
DOI: 10.3390/app10103515.
17. **Д.В. Макаров, А.В. Светлов, А.А. Горячев, О.Т. Коница, В.А. Маслобоев**
Горный информационно-аналитический бюллетень, 2021, №5, 122.
DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_122.
18. **Л.А. Рябова, Е.М. Ключникова**
Север и рынок: формирование экономического порядка, 2018, №3, 91. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.3.2018.59.91-111.
19. **Л.А. Рябова, Е.М. Ключникова, Е.А. Боровичев, В.А. Маслобоев**
Север и рынок: формирование экономического порядка, 2020, №3, 40. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2020.69.003.
20. **А.В. Маслобоев, В.А. Маслобоев**
Надежность и качество сложных систем, 2021, №3, 98 (на англ.).
DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-13.
21. **Д.Б. Денисов, Л.В. Иванова, Л.Г. Исаева, Е.М. Ключникова, Д.В. Макаров, В.А. Маслобоев, Л.А. Рябова**
Сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных неопределенностей и изменений климата, под ред. В.А. Маслобоева, Л.А. Рябовой, Е.М. Ключниковой, РФ, Апатиты, Изд. Кольского научного центра РАН, 2019, 52 с.
DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-394-8.
22. **Природа и коренное население Арктики под влиянием изменения климата и индустриального освоения: Мурманская область**, под ред. Е.А. Боровичёва, Н.В. Вронского, РФ, Москва, Изд. Дом «Графит», 2020, 180 с.
DOI: 10.25702/KSC.978.5.902643.46.3.

[illegible]

Areas of Intensive Nature Management in the Russian Arctic under Climate Change Conditions: Natural and Social Processes in the Long Term*

Masloboev Vladimir Alexeevitch
Federal Research Center
Kola Science Center, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
v.masloboev@ksc.ru

Makarov Dmitriy V. Director of
Institute of North Industrial Ecology
Problems,
Kola Science Centre, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
d.makarov@ksc.ru

Eugene A. Borovichev
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
e.borovichev@ksc.ru

Elena M. Klyuchnikova
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
e.klyuchnikova@ksc.ru

Ludmila G. Isaeva
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
lisaeva@ksc.ru

Larisa A. Riabova
Luzin Institute for Economic Studies,
Kola Science Centre, RAS
24A Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
larissar@iep.kolasc.net.ru

Dmitrii B. Denisov
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
professuir@gmail.com

Anton V. Svetlov
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
a.svetlov@ksc.ru

Eugenia A. Krasavtseva
Federal Research Center
Kola Science Center, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
Vandeleur2012@vandex.ru

Victoria V. Maksimova
Federal Research Center
Kola Science Center, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
v.maksimova@ksc.ru

Svetlana I. Mazukhina
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
simazukhina@mail.ru

Tatyana A. Sukhareva
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
t.sukhareva@ksc.ru

Vyacheslav V. Ershov
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
slavo91@gmail.com

Natalia E. Koroleva
Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-
Institute, Kola Science Centre, RAS
18A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
flora012011@yandex.ru

Ludmila V. Ivanova
Luzin Institute for Economic Studies,
Kola Science Centre, RAS
24A Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
ludmila_ivanova@mail.ru

Alexander V. Losev
Polar Geophysical Institute, RAS
26A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
aleksandrthelosev@gmail.com

Abstract

The work summarizes the results of investigations carried out in three directions (blocks).

Block 1. Terrestrial ecosystems in areas of intensive nature management are investigated. Climatic changes and anthropogenic impact result in transformation of landscapes with disturbed or completely destroyed vegetation cover. In freshwater ecosystems cardinal changes in the structural and functional organization from the multifactorial anthropogenic load against the background of a warming climate were revealed. We obtained unique data on the long-term dynamics of biodiversity in aquatic ecosystems.

Block 2. Enrichment tailings properties were studied, the influence of the dusting season duration and humidity changes on the gross dust emission was assessed; interaction of tailings with soil waters was studied. The potential ecological danger of tailings mineral particles getting into the soil was shown. The losses of non-ferrous metals during the period of waste storage under different climate change scenarios were estimated.

Block 3. People's perceptions of climate change and its social consequences have been studied. The problem of climate change clearly correlates with ecological problems. The impact of the COVID-19 pandemic on the Arctic in the context of climate change was studied. The pandemic highlighted the unsustainability of the rotational method of resource development, with rotational camps becoming focal points of epidemiological hazards.

Keywords: natural resource intensive areas, Arctic, adaptation strategies, mining waste, sustainable development.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60142).

References

1. V.V. Ershov, L.G. Isaeva, T.A. Sukhareva, G.P. Urbanavichus, E.A. Ivanova, E.A. Belova
Herald of the Kola Science Centre of RAS, 2021, **13**(2), 34 (in Russian). DOI: 10.37614/2307-5228.2021.13.2.004.
2. V.V. Ershov, N.V. Lukina, M.A. Danilova, L.G. Isaeva, T.A. Sukhareva, V.E. Smirnov
Rus. J. Ecology, 2020, **51**(4), 319.
DOI: 10.1134/S1067413620040050.
3. T.A. Sukhareva, V.V. Ershov, L.G. Isaeva, M. A. Shkondin
Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals], 2020, №8, 33 (in Russian).
DOI: 10.17580/tsm.2020.08.05.
4. E.A. Borovichev, V.N. Petrov, O.V. Petrova, N.E. Koroleva
Arctic and North, 2018, №32, 107 (in Russian).
DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.32.107.
5. A.N. Sharov, D.B. Denisov
In Lake Water: Properties and Uses (Case Studies of Hydrochemistry and Hydrobiology of Lakes in Northwest Russia), Ser. *Climate Change and its Causes, Effects and Prediction*, Eds L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, T.Y. Vorobyeva etc., USA, NY, New York, Nova Sci. Publ., Inc., 2021, pp. 153–191.
6. V.A. Masloboev, A.V. Svetlov, D.V. Makarov, S.G. Seleznev
Minerals, 2018, **8**(10), 436. DOI: 10.3390/min8100436.6.
7. A.V. Svetlov, P.V. Pripachkin, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
J. Mining Sci., 2020, **56**(2), 275. DOI: 10.1134/S1062739120026757.
8. D.V. Makarov, E.A. Borovichev, E.M. Klyuchnikova, V.A. Masloboev
Vestnik of MSTU, 2020, **23**(1), 63 (in Russian).
DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-63-71.
9. V.A. Masloboev, D.V. Makarov, E.M. Klyuchnikova
Sust. Develop. Mountain Territor., 2021, **13**(2), 188 (in Russian).
DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-188-200.
10. K.V. Chudnenko
Thermodynamic Modeling in Geochemistry: Theory, Algorithms, Software Applications [Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimii: Teoria, algoritmy, programnoe obespechenie prilozheniya], RF, Novosibirsk, Academic Publ. House "Geo", 2010, 287 pp. (in Russian).
11. S.I. Mazukhina, V.V. Maksimova, K.V. Chudnenko, V.A. Masloboev, S.S. Sandimirov, S.V. Drogobuzhskaya, P.S. Tereshchenko, V.I. Pozhilenko, A.V. Gudkov
Water Quality in the Arctic Zone of the Russian Federation: Physical and Chemical Modeling of Water Formation, Forms of Element Migration, Impact on the Human Body: Monograph [Kachestvo vod Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: fizikokhimicheskoe modelirovanie formirovaniya vod, formy migratsii elementov, vliyaniye na organizm cheloveka: monografiya], RF, Apatity, RAS Kola Sci. Centre Publ. House, 2020, 158 pp. (in Russian).
DOI: 10.37614/978.5.91137.437.2.
12. S.I. Mazukhina, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
Chem. Sustain. Develop., 2021, **29**(1), 68.
DOI: 10.15372/CSD2021279.
13. E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov, E. Potorochin
Minerals, 2021, **11**(10), 1077. DOI: 10.3390/min11101077.
14. E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov
Toxics, 2021, **9**(7), 163. DOI: 10.3390/toxics9070163.
15. S. Mazukhina, E. Krasavtseva, D. Makarov, V. Maksimova
Minerals, 2021, **11**(9), 996.
DOI: 10.3390/min11090996.
16. O.V. Suvorova, E.A. Selivanova, J.A. Mikhailova, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
Appl. Sci. (Switzerland), 2020, **10**(10), 3515.
DOI: 10.3390/app10103515.
17. D.V. Makarov, A.V. Svetlov, A.A. Goryachev, O.T. Konina, V.A. Masloboev
MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2021, №5, 122 (in Russian).
DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_122.
18. L.A. Ryabova, E.M. Klyuchnikova
Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poriyadka [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2018, №3, 91 (in Russian).
DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.3.2018.59.91-111.
19. L.A. Ryabova, E.M. Klyuchnikova, E.A. Borovichev, V.A. Masloboev
Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poriyadka [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2020, №3, 40 (in Russian).
DOI: 10.37614/2220-802X.2.2020.69.003.
20. A.V. Masloboev, V.A. Masloboev
Reliability & Quality of Complex Systems, 2021, №3, 98.
DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-13.
21. D.B. Denisov, L.V. Ivanova, E.M. Klyuchnikova, D.V. Makarov, V.A. Masloboev, L.A. Riabova
Development Scenarios of the Murmansk Region under the Conditions of Global Uncertainties and Climate Change [Stsenarii razvitiya Murmanskoy oblasti v usloviyakh globalnykh neopredelennostey i izmeneniy klimata], RF, Apatity, RAS Kola Sci. Centre Publ. House, 2019, 52 pp. (in Russian).
DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-394-8.
22. *Nature and Indigenous People of the Arctic under the Influence of Climate Change and Industrial Development: Murmansk Oblast [Priroda i korennoe naselenie Arktiki pod vliyaniem izmeneniya klimata i industrialnogo osvoeniya: Murmanskaya oblast]*, Eds E.A. Borovichev, N.V. Vronsky, RF, Moscow, Grafit Publ. House, 2020, 180 pp. (in Russian).
DOI: 10.25702/KSC.978.5.902643.46.3.

Антропогенно индуцированные процессы в водах суши арктических регионов*

Т.И. Моисеенко, М.М. Базова

Дается характеристика особенностей развития антропогенно обусловленных процессов в водах суши арктического бассейна, таких, как эвтрофирование, закисление и токсичное загрязнение, в условиях изменяющегося климата. Показаны основные изменения в экосистемах и периоды возникновения наиболее опасных ситуаций. Обосновываются критерии диагностики неблагоприятных процессов и необходимость ужесточения нормативов качества вод для арктических регионов.

Ключевые слова: арктический бассейн, воды суши, эвтрофирование, закисление, токсичное загрязнение, критерии оценки.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№15-29-06948 и 18-05-60012) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №0137-2019-0008).*

Введение

Поверхностные воды суши являются компонентом природы, сознательные преобразования или попутные изменения которого в результате человеческой деятельности наиболее существенны. Антропогенный фактор в формировании химического состава вод становится по значимости в одном ряду с природными геохимическими и биологическими процессами. Тысячи тонн минеральных солей (сульфатов, хлоридов), взвешенных веществ, биогенных элементов, сотни тонн тяжелых металлов поступают в водные системы водосбора Арктического бассейна [1]. Ситуация усугубляется выпадением на территорию водосбора тяжелых металлов и кислых осадков из загрязненной атмосферы.

Нарастание антропогенной нагрузки на природные комплексы Евро-Арктического региона шло с 1930-х до 1980-х годов параллельно с увеличением мощности производств. Предпринимаемые в этот период небольшие усилия по вводу в эксплуатацию очистных сооружений и частичного водооборота не приводили к заметному улучшению экологической обстановки в озерах и реках, загрязнение продолжало увеличиваться и достигло максимума в 1985-1990 гг.

Экономический кризис и приостановка деятельности производств в 1990–2000 гг., особенно на апатитовых и медно-никелевых предприятиях Кольского Севера, привело к сокращению объемов сброса

сточных вод в водоемы и выбросов в атмосферу, что снизило уровень загрязнения вод суши. Оживление экономики в последние годы сопровождается модернизацией технологий на производствах и продолжающимся снижением техногенных выбросов в воды суши и в атмосферу. Следует отметить, что с 2021 г. остановлена выплавка руд в п. Никель.

Высокая обеспеченность регионов Севера водными ресурсами до последнего времени не вызывала тревогу об их состоянии. Вместе с тем, интенсивное освоение богатых месторождений полезных ископаемых и трансграничные переносы загрязняющих веществ в Арктику приводят к быстрому нарушению хрупкого экологического равновесия уже во многих урбанизированных районах, что стремительно ведет к качественному истощению водных ресурсов в промышленных городах и поселках этого региона. Анализ имеющихся научных материалов по оценке качества поверхностных вод арктического бассейна выявил низкую степень изученности этого региона. Основные исследования



МОИСЕЕНКО

Татьяна Ивановна
член-корреспондент РАН,
профессор
Институт геохимии и
аналитической химии им.
В.И. Вернадского РАН



БАЗОВА

Мария Михайловна
Институт геохимии и
аналитической химии им.
В.И. Вернадского РАН

сосредоточены в нижних течениях крупных рек, а также в импактных зонах загрязнения [2–4].

Мониторинг качества вод арктического бассейна, как правило, осуществляется на водных объектах – приемниках сточных вод, концентрируется на измерении содержания отдельных компонентов загрязнения без учета всего комплекса биогеохимических процессов, протекающих в водных объектах арктического бассейна.

Известно, что в России существует единая система стандартов качества вод – предельно допустимые концентрации (ПДК) [5], которые используются в приложении к водным объектам на всей территории России – от арктических до степных регионов. Для арктической зоны подобные оценки, как и система ПДК, не приемлемы, поскольку не учитываются особые условия формирования вод, специфические характеристики различных водных объектов и высокая уязвимость водных обитателей к действию токсичных элементов и веществ. Перечень измеряемых показателей неполный, измерения многих токсичных органических веществ и элементов не входят в задачи контроля качества вод (например, измерения содержания ртути, кадмия, свинца, а также некоторых хлорорганических и полиароматических соединений и др.). Многие постоянно измеряемые элементы имеют природное происхождение. Например, повышенные содержания меди, железа и марганца в воде являются характеристикой высокоцветных вод, обогащенных гумусом, на обширных заболоченных территориях этого региона.

Следует отметить, что, наряду с крупными речными бассейнами, на территории находится большое количество озер, которые подвержены воздействию атмосферных выпадений, поэтому их химический состав может отражать влияние региональных выбросов в атмосферу, а также трансграничных переносов

загрязняющих веществ в Арктику (рассеянные металлы, биогенные элементы, стойкие органические загрязнения и др.). На качество вод значимо влияет потепление климата через изменение гидрологических условий и биогеохимических циклов элементов.

В условиях Арктики взаимодействие антропогенных факторов с окружающей средой имеет наиболее выраженные отрицательные эффекты вследствие низких уровней массо- и энергообменов. В то же время пресные водоемы здесь приобретают особое значение в силу больших запасов высококачественной пресной воды и ценной рыбной продукции в виде лососевых и сиговых рыб. Доказано, что в водах суши этой зоны развиваются антропогенно индуцированные процессы, такие как эвтрофирование, закисление, появление токсичных элементов в региональном и глобальном срезах [2–4], которые способны привести к негативным изменениям качества вод.

Целью данного обобщения было:

- дать характеристику особенностей формирования химического состава вод;
- выделить ключевые антропогенно индуцированные процессы, которые развиваются в поверхностных водах суши Арктической зоны;
- определить долговременные тенденции изменения качества вод в условиях снижения антропогенных воздействий и потепления климата;
- разработать критериальную систему для ранней диагностики неблагоприятных процессов в водах суши Арктического бассейна на основе обобщения результатов собственных исследований и литературных источников;
- определить численные значения регистрации начального развития процессов и значений, при которых создаются опасные условия для водных обитателей этого региона.

Кольский Север России является наиболее промышленно освоенным и, соответственно, урбанизированным регионом Арктики, поэтому рассмотрены процессы, которые наиболее отчетливо проявились в данном регионе.

Природные характеристики и факторы уязвимости

Климатические условия Арктики определяют ряд специфических особенностей формирования качества вод суши, обуславливающих их уязвимость к антропогенным нагрузкам (рис. 1).



Рис. 1. Арктическая зона и расположение в ней основного объекта исследований – Кольского Севера.

Формирование поверхностного стока в условиях избыточного увлажнения обуславливает низкую минерализацию и олиготрофный характер вод, так как коренные породы мало выщелачиваются, четвертичные отложения сильно перемыты, почвенный покров тонок. Низкие среднегодовые температуры воздуха ослабляют процессы водной эрозии, следствием этого является низкая минерализация вод суши; неразвитость почвенного покрова делает геохимический состав подстилающих пород определяющим фактором в формировании химического состава поверхностных вод [6]. Питание озер и рек в большей степени определяется атмосферными осадками, до 75–90% годового стока приходится на весеннее половодье и летне-осенний дождевой паводок. Аккумуляция атмосферных выпадений в снежном покрове происходит в течение длительной полярной зимы (6–8 месяцев), и в короткий период весеннего половодья они стремительно поступают в водосборные бассейны.

Во время снеготаяния почва находится в промерзшем состоянии, так что ее верхний слой практически водонепроницаем в течение почти всего периода снеготаяния. Слабое развитие растительности и тонкий почвенный покров обеспечивают высокий дренаж выпадающих осадков и в летнее время. Следствием преобладания выпадений над испарением и замедленных процессов минерализации

органического вещества является наличие большого количества верховых мелких заболоченных озер с высоким содержанием гумуса и природно-кислыми водами, так называемых “wetland pond”.

В олиготрофных ультрапресных водах с низкими круглогодичными температурами миграционная способность загрязняющих веществ высока, цикл их существования в водоеме в растворенном виде более продолжителен, ионное равновесие неустойчиво и токсичные воздействия в слабоминерализованных водах много выше. Низкое видовое разнообразие и короткие пищевые цепи способствуют быстрому продвижению опасных элементов и веществ к конечным продуцентам – рыбам и, соответственно, – их потребителям.

Характеристика фоновых условий крайне важна в оценках степени современных изменений качества вод суши. На примере Кольского п-ова приведены данные по вариативности химического состава вод относительно малых озер (площадь до 20 км²), а также данные, характеризующие воды крупных озерных систем Кольского Севера (табл. 1 и 2). В целом воды характеризуются низкой минерализацией и малыми содержаниями биогенных элементов (БЭ). Встречаются дистрофные озера, для которых характерны высокие значения DOC – содержания органического вещества гумусовой природы (гумусовых кислот). Как правило, это верховые заболоченные озера с низкими *pH* вод. Крупные озера арктического бассейна в природном состоянии – ультрапресные и олиготрофные с высокой прозрачностью вод. Отметим, что эти показатели химического состава вод характерны для многочисленных озер арктической зоны.

На рис. 2 представлены данные по среднемесячным температурам приземного слоя воздуха в период открытой воды с 1990 по 2018 гг. При высокой вариативности темпера-

Таблица 1. Распределение основных показателей химического состава поверхностных вод (по накопленным процентам) Кольского Севера. Жирным шрифтом выделены медианные значения показателей

Показатели качества воды	Распределение значений показателей						
	Процентиль						
	2.5%	10%	25%	50%	75%	90%	97.5%
pH	4.49	4.80	5.92	6.45	6.79	7.11	7.34
$[Ca^{2+}+Mg^{2+}+Na^{+}+K^{+}]$, мкэкв/л	28	51	95	172	277	391	1019
Щелочность Alk , мкэкв/л	<0	<0	32	79	170	266	558
$[SO_4^{2-}]$, мкэкв/л	1	10	20	36	65	106	352
DOC в пересчете на углерод, мг/л	2.22	3.51	4.86	7.62	11.82	17.36	26.92
$[N_{tot}]$, мкг/л	66	94	135	201	299	478	848
$[P_{tot}]$, мкг/л	1	2	3	6	10	20	49
$[Mn]$, мкг/л	1.2	1.7	2.8	12.7	24	35	49
$[Fe]$, мкг/л	25	75	145	430	920	1 600	1 820
$[Zn]$, мкг/л	0.4	0.7	1.2	1.9	3.3	4.6	7.0
$[Cu]$, мкг/л	0.3	0.6	1.5	4.3	5.5	6.8	12.9

Таблица 2. Гидрохимические показатели, отражающие вариабельность природного состояния крупных озер на основе изучения фоновых незагрязненных участков в 1970–1980-х гг.; физико-химические характеристики озер: S – площадь, h – глубина

Показатели качества воды	Пределы варьирования показателей		
	Имандра, $S=880 \text{ км}^2$, $h_{\text{макс}}=64 \text{ м}$, $h_{\text{ср}}=13.4 \text{ м}$	Умбозеро, $S=313 \text{ км}^2$, $h_{\text{макс}}=115 \text{ м}$, $h_{\text{ср}}=32.5 \text{ м}$	Ловозеро $S=200 \text{ км}^2$, $h_{\text{макс}}=35 \text{ м}$, $h_{\text{ср}}=5.7 \text{ м}$
pH	6.4–7.2	6.4–7.2	6.4–7.2
O_2 , % насыщения	60–100	60–100	60–100
Общее солесодержание, мг/л	20–30	15–20	20–30
$[Ca^{2+}]$, мг/л	1.6–4.0	1.4–1.8	1.2–2.2
$[Mg^{2+}]$, мг/л	0.5–1.3	0.4–1.8	0.6–1.6
$[Na^{+} + K^{+}]$, мг/л	2.5–7.5	2.2–3.2	3.5–7.6
$[HCO_3^{-}]$, мг/л	13–18	5–9	10–15
$[SO_4^{2-}]$, мг/л	1.0–3.0	0.5–1.0	1.0–2.0
$[Cl^{-}]$, мг/л	1.4–1.8	1.0–1.5	1.0–1.5
$[PO_4^{3-}]$ в пересчете на фосфор, мкг/л	0–8	0–2	0–18
$[P_{tot}]$, мкг/л	2–10	0–3	5–12
$[N_{tot}]$, мкг/л	10–100	10–50	10–100
$[Si]$, мг/л	0.3–0.8	0.3–0.6	0.3–0.8
DOC , в пересчете на углерод, мг/л	3–6	2–3	4–10
$[Ni]$, мкг/л	≤ 1	≤ 1	≤ 1
$[Cu]$, мкг/л	1–2	≤ 1	1–3
$[Sr]$, мкг/л	10–30	40–60	30–50
$[Al]$, мкг/л	10–20	10–20	30–50
$[Fe]$, мкг/л	≤ 15	6–20	70–120
$[Mn]$, мкг/л	≤ 5	1–3	8–22
$[Zn]$, мкг/л	≤ 2	≤ 2	≤ 2

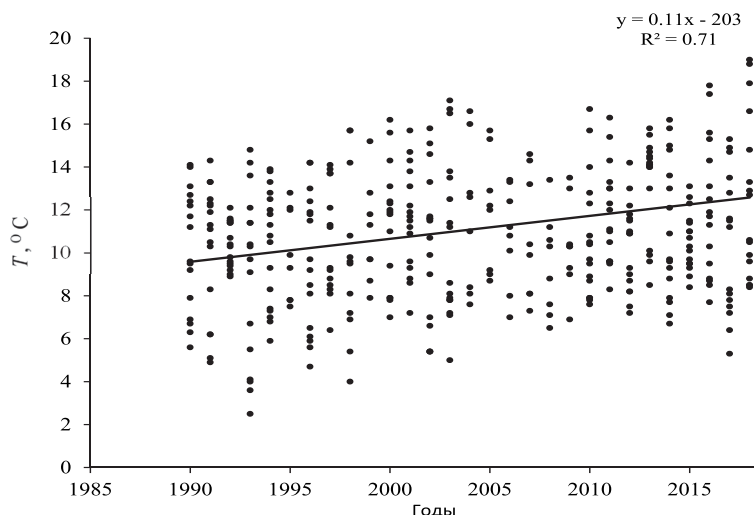


Рис. 2. Среднемесячные температуры приземного слоя воздуха в период открытой воды с 1990 по 2018 гг. [7].

тур воздуха мы видим достоверный тренд повышения температуры ($SKT=4.71$, $p<0.001$). Эти данные свидетельствуют о наметившейся тенденции к повышению температуры, которое повлечет изменения биогеохимических циклов элементов в системе «водосбор–водоем».

Ионное равновесие и закисление вод

Проблема закисления вод актуальна для Европейского Севера, где, наряду с локальными источниками эмиссии антропогенной серы, оказывает воздействие трансграничный перенос загрязненных воздушных масс из Европы. В 1990 г. Россия на примере Кольского Севера впервые включилась в широкомасштабный эксперимент по оценке последствий воздействия аэротехногенного загрязнения на воды суши (проект «Survey Lakes») по единой методологии с другими северными странами, которые проводились с периодичностью каждые 5 лет, последняя съемка – в 2005 г.

Интенсивность закисления определяется двумя условиями: а) уровнем антропогенной нагрузки с учетом фактора продолжительности действия и б) природной чувствительностью территории. Локальными источниками поступления кислотообразующих веществ в атмосферу являются металлургические предприятия, а также тепловые станции, использующие уголь.

Образование кислотных осадков связано со сложными превращениями химических форм элементов в тропосфере и стратосфере. Выпадение антропогенной серы в промышленных центрах превышало $2 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$, а на 1/3 части территории – $1 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$. В последние годы (с 2015 г.) эмиссия антропогенной серы значительно снизилась – до $0.37 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$ [8]. Геоологические условия региона, а именно их буферная

емкость, являются не менее важным параметром, определяющим интенсивность закисления вод. На большей части водосбора развиты гранито-гнейсовые формации, поэтому закисление вод проявилось на Кольском п-ове [8]; также есть отрывочные данные о значительном закислении озер Архангельской области [9].

Если водосбор имеет богатую щелочную почву, то кислотные дожди нейтрализуются, поэтому вода, поступающая в озеро, имеет низкую кислотность. В районах, где постоянное поступление основных (щелочных) катионов не обеспечено, постепенное истощение бикарбонатов в озере означает, что стабильный pH будет быстро падать и это приведет к закислению таких озер [10, 11].

Симптомом закисления вод является не только снижение pH воды (это уже следствие), но и нарушение ионного равновесия вследствие геохимических преобразований водосборов. Показатель кислотонейтрализующей способности (ANC) является наиболее распространенным критерием закисления вод. Разница между суммой катионов (с коррекцией на морскую соль) и радикалами сильных кислот отражает запас или дефицит гидрокарбонатов, а в случае с водами, обогащенными гумусовыми кислотами, – их сумму, то есть буферную способность системы [12]. Кислотонейтрализующая способность вод может быть рассчитана двумя методами:

$$ANC_1 = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+ - SO_4^{2-} - NO_3^- \quad (1)$$

$$ANC_2 = HCO_3^- + An^x - H^+ - Alk^{y+} \quad (2)$$

Американские исследователи экстремальным считают снижение значения ANC до 50 мкэкв/л [12], норвежские специалисты – 20 мкэкв/л [13].

На примере Кольского Севера доказано, что закисление вод в северных широтах проявляется:

– в снижении pH воды малых

озер преимущественно автономных ландшафтов;

- в появлении кислотных эпизодов в период половодья на малых ручьях;
- в снижении буферной емкости крупных водосборов [14].

Среди обследованных 460 озер в 1995 г. кислые озера с $pH < 6$ составили 26%, а с $pH < 5$ – 11%. В состоянии риска закисления находилось около 30% обследованных озер, то есть щелочность составляет менее 50 мэкв/л.

Снижение эмиссии кислотообразующих газов в последние годы привело к восстановлению закисленных вод [15]. Обзор литературы показал, что намечаются три сценария развития ситуации пролонгированного изменения водной химии при снижении выпадения кислот:

- 1) развивается дальнейшее закисление вод;
- 2) pH и щелочность не изменяются;
- 3) происходит восстановление кислотонейтрализующей способности вод.

Неравномерность тенденций восстановления в различных странах и регионах при идентичных условиях снижения содержания сульфатов в воде объясняется особенностями формирования вод на водосборе. Отмечаются общие тенденции изменения ряда других химических показателей, которые наблюдаются в озерах и реках Европы и Северной Америки: увеличение содержания растворенного органического вещества (DOC), общего азота и общего фосфора, снижения содержания основных катионов [15–17], как следствие комплексного влияния снижения потока сульфатов на водосборы и повышения температуры.

На рисунке 3 отражены изменения снижения содержаний SO_4^{2-} и увеличение ANC . В целом в озерах, исследованных с 1990 г. раз в 4–5 лет, к 2018 г. достоверно снизились содержания SO_4^{2-} (с 89 до 41 мэкв/л по медианным значениям) и возрос показатель ANC (медианные значения

увеличились с 89 до 168 мэкв/л). Минимальные значения также возросли, но остались в ряде озер в категории критических низких значений (от 23 до 11 мэкв/л). В 1990-х гг. было отмечено 34% озер, в воде которых среди анионов доминировали сульфаты, к 2010 г. их количество снизилось до 25%, к 2018 г. – до 8%.

Особенности эвтрофирования в условиях потепления климата

Эвтрофирование вод Арктического бассейна практически не освещено в современной научной литературе. В отчетах АМАП [2, 3] эта проблема не обозначена. На многочисленных конференциях, связанных с исследованиями арктического бассейна, вопрос об особенностях эвтрофирования вод высоких широт не выносится на обсуждение даже в связи с потеплением климата. Бесспорно, природные условия формирования вод этого региона, а именно большой вклад атмосферного питания, высокий промывной режим озер и низкие температуры замедляют эвтрофирование вод. Отсутствие своевременных знаний об особенностях эвтрофирования вод в холодных широтах может привести

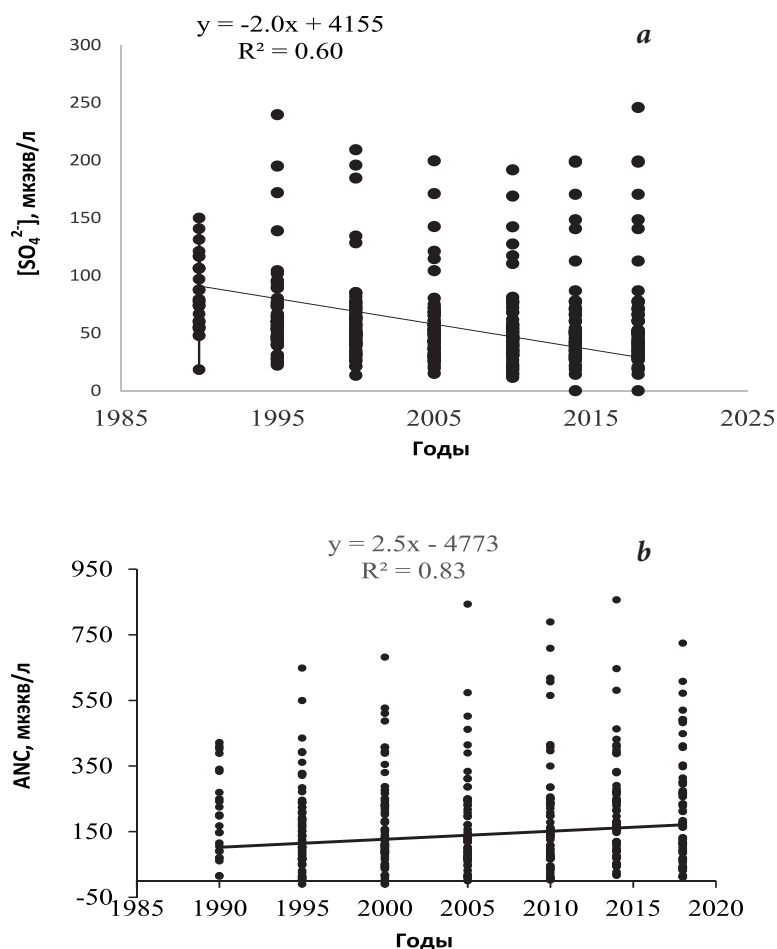


Рис. 3. Распределение SO_4^{2-} и ANC в воде озер Кольского региона за 28-летний период (1990–2018 гг.): $SKT = -5.85$, $p < 0.001$ и $SKT = 7.15$, $p < 0.001$.

к недооценке экологических последствий данного явления. Б. Хендерсон-Селлерс и Х. Марклэнд [18] отмечали в своей работе необходимость всестороннего рассмотрения явления эвтрофирования, подчеркивая, что одностороннее использование одного или нескольких критериев может привести к искажению реально существующей картины. В работе [19] на примере ряда водных объектов Кольского Севера (заливы р. Пасвик, озера Имандра и др.), загрязняемых хозяйственно-бытовыми или сельскохозяйственными стоками, показано, что эвтрофирование проявляется:

- 1) развитием дефицита кислорода в придонных слоях воды в подледный период длительной полярной зимы;
- 2) «цветением» воды вследствие интенсивного развития фитопланктона в пик весенней (апрель) и летней (конец июля – начало августа) вегетации до значений, соответствующих эвтрофному и гипертрофному уровням – 1–5 тыс. клеток/м³;
- 3) снижением видового разнообразия за счет исчезновения северных требовательных к качеству вод видов;
- 4) увеличением показателя содержания хлорофилла «а», используемого при измерении «откликов» экосистемы на биогенную нагрузку, в 10–12 раз.

Анализ долговременных тенденций изменчивости вод озер показал увеличение содержаний биогенных элементов в водах суши, которое происходит синхронно с нарастанием содержаний фосфора и азота. Согласно индексу R.E. Carlson [20], количество олиготрофных озер снизилось даже в случаях отсутствия какой-либо антропогенной нагрузки на них. Эти данные согласуются с результатами исследований озер Северной Америки, которые свидетельствуют о глобальных тенденциях обогащения вод биогенными элементами и повышения трофического статуса озер. Для различных ландшафтных зон Кольского Севера (тундровой, лесотундровой и северо-таежной) были рассчитаны значения ин-

декса трофического состояния *TSI* за два периода: 1990–2000 и 2010–2018 гг. и оценен трофический статус озер (табл. 3). Было отмечено, что к 2010–2018 гг. (по сравнению с 1990–2000 гг.) в тундровой зоне количество олиготрофных озер сократилось на 54%, в то же время увеличилось количество мезотрофных – на 33%, эвтрофных – на 21%. В период 2010–2018 гг. в лесотундровой и северо-таежной зонах не сохранились олиготрофные озера, сократилось число мезотрофных озер (на 14% и 15% соответственно) и значительно увеличилось число эвтрофных (на 66% и 48% соответственно).

Для арктических водоемов роль БЭ в эвтрофировании существенно выше за счет увеличения уязвимости сообществ, связанной с продолжительным периодом существования ледового покрова. Наибольшая концентрация P_{tot} (до 200–250 мкг/л) наблюдается в воде в местах выпуска хозяйственно-бытовых стоков. Одним из основных негативно действующих факторов при эвтрофировании вод является большая продолжительность зимнего периода с преобладанием процессов молекулярного переноса над конвективным перемешиванием. Поэтому, несмотря на низкие температуры и скорости расхода O_2 , к окончанию зимнего периода развивается явление аноксии у дна [19]. Для озера Имандра зависимость развития кислородного дефицита от накопления фосфора аппроксимируется уравнением (3) и показывает значительное

Таблица 3. Трофический статус озер (*TSI*) Кольского Севера в различных ландшафтных зонах [20]

Типы озер (<i>TSI</i>)	Количество озер, %					
	I – Тундровая зона, <i>n</i> =15		II – Лесотундровая зона, <i>n</i> =21		III – Северо-таежная зона, <i>n</i> =32	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*
Олиготрофные (0–30)	67	13	52	0	33	0
Мезотрофные (30–50)	20	53	43	29	25	10
Эвтрофные (50–70)	13	34	5	71	42	90

* Периоды: 1 – 1990–2000 гг., 2 – 2010–2018 гг.

расходование кислорода в условиях накопления фосфора:

$$[O_2] = 96 - 1.04 \cdot [P_{tot}] \quad (r=0.61; p=0.05). \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показывает, что опасным является повышение содержания P_{tot} в водоеме до значения 90 мкг/л – при данном значении в толще воды растворенный кислород будет отсутствовать, соответственно, образуются заморные условия для фауны, то есть проявится крайний случай негативных последствий эвтрофирования. Природные воды Кольского п-ова содержат чрезвычайно низкие концентрации хлорофилла a ($Chla$) – 0.5–1 мкг/л, в условиях эвтрофирования данный показатель увеличивается до 10–150 мкг/л, что соответствует эвтрофному состоянию водоема. Зависимость содержания $Chla$ от концентрации фосфора в эвтрофируемых водоемах Кольского Севера аппроксимируется уравнением [19]:

$$[Chla] = 0.92 \cdot \ln[P_{tot}] - 0.45 \quad (r=0.82; p=0.05). \quad (4)$$

Анализ полученного уравнения (4) на примере озера Имандра показал, что развитие процесса эвтрофирования вод, при котором озеро переходит в мезотрофное состояние, происходит при содержании $Chla$ более 15 мкг/л, а максимальные значения, при которых озеро переходит в эвтрофное состояние, – концентрации более 200 мкг/л. По данным [19] в местах эвтрофирования (плёс Большая Имандра) водоемов арктического бассейна возрастает доля зеленых, криптофитовых и сине-зеленых в общей биомассе фитопланктона.

Влияние потепления климата проявится, несомненно, в усилении продукционных процессов в арктической зоне, что, с одной стороны, приведет к более активному поглощению биогенных элементов, как на водосборе, так и в трофической

структуре водных экосистем. В работах ряда ученых появилась информация, показывающая феномен повсеместного увеличения в водах суши содержания органического вещества гумусовой природы на многих континентах; это происходило на фоне снижения содержаний техногенных сульфатов и увеличения буферной способности вод (ANC). Этот феномен наблюдался в озерах и реках Европы и Северной Америки [15–17, 21]. Временное увеличение DOC было названо «brownification» – окрашивание воды в желто-коричневый цвет, вызванное поступлением растворенного гумусового вещества из наземных экосистем и водно-болотных угодий, что характерно для озер с высоким содержанием DOC [21–23]. Наши данные показывают достоверную зависимость содержания в воде DOC , как и общих форм азота и фосфора, от температурных условий (рис. 4 а–в). Возрастающие из года в год значения соотношений $[P_{tot}]/[PO_4^{3-}]$ и $[N_{tot}]/[NO_3^-]$ свидетельствуют об успешной утилизации биодоступных форм в экосистемах и нарастании органического вещества в экосистемах при потеплении климата.

При оценке состояния водоемов арктического бассейна в условиях биогенной нагрузки необходим всесторонний комплексный подход по ряду критериев (придерживаясь их минимальных границ), а также учет «шага» развития водоема к качественно новому состоянию по отношению к природному: в работе [24] предложена градация, наиболее приемлемая для арктических вод. Концентрация $Chla$, при которой арктические озера будут соответствовать мезотрофному статусу, будет составлять 2–6 мг/м³ и эвтрофному – более 6 мг/м³.

Уровни содержания и круговорот металлов

Выделено три основных процесса, приводящих к высоким уровням содержания металлов в поверхностных водах суши:

- 1) распространение в составе сточных вод металлургических производств;
- 2) распространение с дымовыми выбросами;
- 3) кислотное выщелачивание из окружающих пород, в особенности природных геохимических формаций.

В составе стоков металлургических производств и аэротехногенных потоков большой спектр элементов (Ni , Cu , Mn , Sr , Fe , Al , Co , Cr , Cd , Pb и As) поступает в водные бассейны и мигрирует, в основном, в ионной, наиболее токсичной, форме. Содержание лабильных (ионных) форм металлов в водах Севера значительно превышает количество связанных и закомплексованных вследствие чрезвычайно низкой комплексообразующей способности вод в

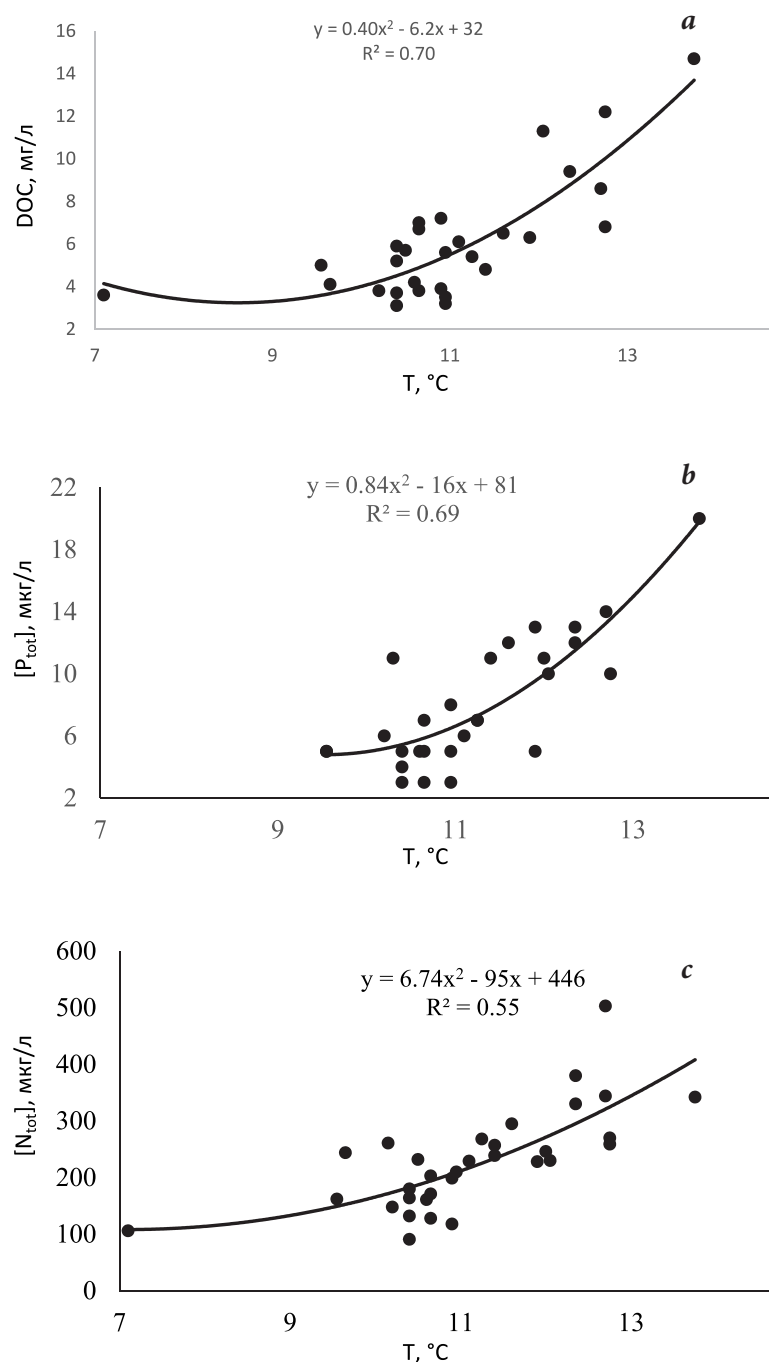


Рис. 4. Зависимости между содержанием растворенного органического вещества DOC в пересчете на углерод (a), общего фосфора (P_{tot}) (b), общего азота (N_{tot}) (c) и средней температурой приземного слоя воздуха за период 1990–2018 гг.

регионах Севера – сумма нелабильных форм рассматриваемых элементов в среднем (для примера, в озере Имандра) не превышает 20 мкг/л, что составляет менее 15% от общего содержания элементов. Основной причиной низкой комплексообразующей способности является чрезвычайно малые содержания взвешенных частиц (<1 мг/л) и органических веществ в воде олиготрофных озер водосбора Белого моря (4.5 мг/л). По данным Родюшкина [25], 1 мг/л органического вещества может связать 4.4 мкг/л условного металла. Адсорбция металлов на осаждающемся материале вследствие его низких содержаний

в водах Севера очень низка и практически не влияет на концентрацию лабильных форм в воде [6].

По способности к комплексообразованию с органическими лигандами в поверхностных водах металлы располагаются в следующий ряд [25, 26]:

$Sr (<1\%) = Mn (<1\%) | < Zn (10\%) < Ni (25\%) < Al (30\%) < Cu (65\%) < Fe (99\%)$.

Низкие содержания органических лигандов приводят к конкурентному связыванию с ними металлов, то есть при низких концентрациях органического вещества в первую очередь будет связано железо (для вод Кольского Севера 80–95% органических лигандов расходуется на комплексы с железом), затем медь и алюминий, остальные элементы находятся в виде ионов (что согласуется с данными прямых измерений). В субарктических водах присутствие железа будет увеличивать степень содержания ионных форм других металлов, то есть их токсичность.

Поглощение металлов фитопланктоном даже в период летней вегетации составляет не более 30% от содержания элемента во взвешенной фракции, которая в целом низка и варьирует для различных металлов. К примеру, если содержание железа в составе фитопланктона олиготрофного озера в период максимума вегетации, по нашим данным, составляет до 18% от общего содержания элемента (от 40–50 мкг/л), меди – до 6% (от 4–5 мкг/л), никеля – до 3% (от 8–12 мкг/л), то остальных – значительно ниже. В осенне-зимние периоды значения биопоглощения металлов водорослями еще ниже [19].

В условиях эвтрофирования в периоды открытой воды и высокого насыщения вод кислородом биопоглощение элементов водорослями может несколько возрасть. Однако в зимний подледный период при появлении кислородного дефицита в придонных слоях воды резко увеличивается значимость процессов десорбции на границе «вода–донные отложения», которые ведут к

значительному повышению концентраций ряда элементов. Данный феномен достаточно хорошо известен для меди и железа, однако исследованиями показано, что в этот процесс вовлекается большой спектр металлов – концентрация элементов в придонных слоях увеличивается, например, для Ni, Mo, Cr, Ba, As до 10, Pb, Cu, Hg – в 5–10 раз [6].

Металлы распространяются в составе пылевых частиц дымовых выбросов металлургических производств и теплоэнергетических объектов, поэтому радиус их влияния не так высок. Этой же закономерности распределения подчиняется группа металлов (Cu, Co, Cr, V, Mo и др.), которые сопутствуют медно-никелевым рудам. Как правило, в прозрачных или обогащенных железом водах эти металлы присутствуют преимущественно в ионных формах и характеризуются теми же закономерностями, как при поступлении в составе стоков. Следует отметить, что в импактных зонах до 90% металлов, выпадающих на подстилающую поверхность, задерживается в верхнем органогенном слое почв, который, с одной стороны, является барьером и препятствует их поступлению в дренажные бассейны, с другой – накопленные в вегетационный период металлы могут являться источниками вторичного загрязнения вод. В условиях сопутствующего закисления содержание ионных форм металлов возрастает вследствие их выщелачивания кислыми осадками из слагающих пород и высвобождения из донных отложений. В пределах Кольского п-ова в озерах в Хибинских горах, где породы легко подвержены химическому выветриванию, отмечаются аномально высокие концентрации катионов алюминия и стронция (до 400 мкг/л), которые формируют техногенные гидрогеохимические аномалии.

Особенно критическая ситуация создается в северных регионах в период половодья, когда талые снеговые воды с высоким содержанием

накопленных металлов и протонов стремительно поступают в водосборные бассейны. Резкое снижение pH сопровождается увеличением содержания многих металлов в ионных формах. Для трех районов арктического бассейна в таблице 4 приведены концентрации металлов в воде малых озер.

Критерии оценки антропогенных процессов в водах суши Арктического региона

Как упоминалось, в России существует единая система стандартов качества вод – предельно допустимые концентрации ПДК, которые используются в приложении к водам на всей территории России – от арктических до степных регионов. В системе мониторинга качества вод предложены различные дополнительные показатели, в основе которых лежит определение ряда гидрохимических индексов, например, индекс загрязнения вод (ИЗВ) [13]:

$$ИЗВ = 1/6 \cdot \sum (C_i / ПДК_i) .$$

По величине ИЗВ качество воды подразделяется на семь классов загрязненности вод: от очень чистой – I (<0.3) до экстремально грязной – VII (>10). Также используется показатель удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). Значение УКИЗВ определяется по частоте и кратности превышения ПДК по нескольким показателям и может варьировать в водах различной степени загрязненности от 1 до 16 (для чистой воды 0). Анализ методов оценки качества вод детально изложен в работе [4]. В проанализированных Государственных докладах об охране природной среды [1] чаще приводится информация о кратности превышений ПДК в тех или иных водных объектах, получающих стоки. В последние 15 лет оценки идут с использованием УКИЗВ. Анализ работ по оценке качества вод в арктических регионах показывает ошибочные значения данных показателей, что искажает оценку загрязнения вод.

В настоящее время управленческие организации в сфере охраны окружающей среды заявили о необходимости включения методов определения биодоступности в оценки рисков загрязнения вод металлами в экологическое регулирование качества вод. Например, принятая Водная рамочная директива по качеству вод в Европейском Сообществе подчеркивает необходимость включения в стандарты качества вод содержание никеля и свинца в их биодоступных формах [27]. Агентство по охране окружающей среды США уже внедрило инструмент оценки биодоступности меди в нормирование загрязнения вод этим элементом [28]. В основе моделей лежит определение количества ионов металлов, которые обладают наибольшей проникающей способностью,

Таблица 4. Медиана и вариабельность концентраций микроэлементов (min–max) в воде малых озер арктических регионов (тундра и лесотундра), не испытывающих прямого загрязнения

Элемент	Концентрация элемента, мкг/л		
	Кольский регион n=35	Ямало-Ненецкий регион n=52	Норильский регион n=12
Al	54.0 (13.7–180)	19.9 (10–310)	14.4 (<3.5–79.9)
Fe	50.0 (4.3–600)	57 (10–1474)	65.5 (<4–227)
Ti	1.79 (0.48–8.27)	<0.6(<0.6–4.8)	0.8 (<0.3–2.2)
Mn	1.6 (0.2–18.0)	6.7 (1.1–26.1)	10.8 (<3.11–37.4)
Sr	11 (4–23)	4.70 (0.70–34.8)	65.4 (13.3–115)
Zr	0.05 (<0.02–0.15)	0.03 (<0.01–0.42)	0.1 (<0.02–0.12)
Rb	0.63 (0.34–1.73)	0.37 (0.16–0.947)	0.5 (0.04–5.63)
V	0.35 (<0.02–0.76)	0.11 (<0.04–1.0)	0.4 (0.15–0.82)
Zn	0.9 (0.2–4.7)	4.33 (1.94–20.0)	4.3 (<0.30–10)
Cr	0.2 (<0.1–0.5)	0.4 (<0.4–0.5)	0.2 (<0.05–0.22)
Ce	0.29 (0.12–1.13)	0.07 (0.02–0.56)	<0.01 (<0.01–0.09)
Ni	0.9 (<0.2–5.5)	0.93 (<0.2–2.78)	4.3 (0.73–15.1)
Cu	0.7 (0.2–2.9)	2.58 (1.23–9.02)	6.3 (2.5–20.5)
Li	0.18 (0.11–0.65)	0.84 (0.32–4.14)	0.4 (0.14–1.64)
La	0.24 (0.07–0.62)	0.04 (0.02–0.17)	<0.007 (<0.007–0.04)
Co	<0.2 (<0.2–0.3)	0.06 (<0.04–0.19)	0.1 (0.03–1.02)
Pb	<0.1 (<0.1–0.6)	0.30 (0.11–3.39)	1.4 (<0.38–1.54)
Sc	0.4 (<0.1–0.8)	<0.04	данных нет
Sn	0.09 (0.04–0.32)	<0.01 (<0.01–0.13)	<0.01
U	0.03 (0.01–0.30)	0.04 (0.02–0.06)	<0.01 (<0.01–0.13)
As	0.1 (<0.1–0.3)	0.43 (0.10–1.56)	0.1 (<0.002–0.19)
Mo	0.14 (0.04–0.32)	0.93 (0.25–6.26)	0.1 (<0.02–0.27)
Sb	0.04 (0.01–0.13)	0.16 (0.12–0.27)	<0.01 (<0.01–0.13)
Cd	0.09 (<0.05–0.21)	0.01 (<0.01–0.08)	<0.01 (<0.01–0.04)
Bi	0.01 (<0.01–0.03)	0.45 (0.13–3.86)	<0.01

то есть их биодоступность [29]. Если нормативы по содержанию ртути в России сопоставимы с западными странами, то по таким токсичным элементам, как свинец и кадмий, они значительно более жесткие в Европе и Америке.

В своих исследованиях мы использовали данный подход к оценке качества вод в арктических регионах. Была рассчитана биодоступность основных металлов и их критические значения с учетом проникающей способности в организм рыб [30]. Исследования на озерах субарктической зоны показали более высокую опасность загрязнения вод металлами вследствие их низкой минерализации и высокой биодоступности тяжелых металлов для водных организмов в северных водах. Исходя из результатов исследований, можно утверждать, что ионная форма нахождения изученных элементов является более биодоступной (за исключением ртути). Поэтому для низкоминерализованных вод Севера требуются корректировки принятых в России ПДК Cd, Pb, Al и Ni в сторону значимого ужесточения нормативов.

Очевидно, что устаревшая система оценки качества вод не может быть применена к водам арктических регионов. Детальные исследования в арктических регионах, обобщение результатов многолетних исследований позволили нам выделить ключевые антропогенно обусловленные процессы в водах суши, их негативные последствия для водных обитателей и предложить критерии, которые позволят регистрировать пороговые значения развития неблагоприятных процессов и критические значения, когда происходит их опасное развитие для водной фауны. Подчеркиваем, что универсальных критериев для оценки всех неблагоприятных процессов в водах суши не существует, например, для оценки закисления вод наиболее информативную оценку изменения в экосистемах формирует зообентосное сообщество, эвтрофирования –

фитопланктонное сообщество, загрязнения металлами – патологии и дисфункции в организме рыб.

Обобщение критериев и их значения представлены в *таблице 5*.

Заключение

Итак, исследования доказывают, что в водных системах арктических регионов, даже в случаях отсутствия прямого загрязнения, развиваются процессы эвтрофирования, закисления и токсичного загрязнения. Температурный фактор в той или иной степени влияет на развитие процессов, изменяя биогеохимические циклы. Система регламентации загрязнений на основе ПДК не учитывает весь комплекс физико-химических и биологических процессов, протекающих в водоемах, специфику и высокую уязвимость природы северных вод.

Не существует единого универсального критерия оценки всех антропогенно индуцированных процессов: при оценке эвтрофирования водоемов наиболее ясную картину формируют показатели изменений фитопланктонного сообщества; при закислении вод – зообентосного сообщества; при токсичном загрязнении вод – организм рыб. В *таблице 5* нами предложена система критериев, позволяющая регистрировать развитие неблагоприятных процессов в водах арктического бассейна.

Концентрации фосфора, стимулирующие начальную стадию эвтрофирования водоема, будут составлять 15 мкг/л, а критической величиной, приводящей к гибели донной фауны, – 90 мкг/л. Однако эти величины могут корректироваться с учетом точности и глубины водоема.

Критическим уровнем снижения кислотонейтрализующей способности низкоминерализованных вод суши будет 50 мкэкв/л, выпадения кислот не должны превышать 20 мг-экв/м²год в кислотоуязвимых регионах по геологическому строению.

Особо опасная ситуация проявления токсичного воздействия в приарктических озерах возникает:

- 1) в условиях формирования кислородного дефицита в период длительной полярной зимы вследствие десорбции металлов из донных отложений;
- 2) в период половодья, когда накопленные в снежном покрове элементы и вещества в период длительной полярной зимы стремительно поступают с водосбора в короткий период снеготаяния в водные объекты.

Нарушения и дисфункции в системах организма лососевых и сиговых рыб являются информативным критерием в диагностике токсичного загрязнения вод арктического бассейна.

Таблица 5. Критерии оценки антропогенно индуцированных процессов в водах арктического бассейна и особенности их проявления

Про- цессы	Критерии оценки	Пороговые значения развития процессов	Критические (опасные) значения	Доказанные негативные эффекты для водных экосистем
Эвтрофирование	BPK_5 , мг/л	5	>30	- Развитие дефицита кислорода в полярную зиму; - два пика «цветения» вод – в апреле подо льдом и в конце июля – августе; - снижение видового разнообразия, включая устойчивое и массовое развитие криптофитовых водорослей и в пик цветения – сине-зеленых; - сокращение численности типичных северных видов и снижение биоразнообразия.
	$[P_{tot}]$, мкг/л	10	>90	
	$[Chla]$, мг/м ³	4	>50	
	$[P_{tot}]/DOC$	>600	<150	
Закисление	pH	<6.5	<5.5	- Гибель организмов в период развития «pH-шока» и стремительного половодья; - развитие кислотоустойчивых мхов; - преобладание ацидофильных видов в фито- и зоопланктоне; - снижение биоразнообразия за счет снижения численности бокоплавов, брюхоногих моллюсков, нимф поденок и веснянок. Бокоплав, типичный обитатель природных олиготрофных вод арктического бассейна не обнаруживается в воде с $pH < 6.5$.
	ANC , мкэкв/л	50	<20	
	CL^* , мг-экв/м ² ·год в уязвимых регионах	>20	0–20	
	$CLex^{**}$, мг-экв/м ² ·год	0–20	>0	
Токсичное загрязнение	Доля рыб с патологиями, %	<1–3	10–15	- Формирование «ударной дозы» в период половодья; - высокий придонный градиент концентраций токсичных элементов в период полярной зимы; - быстрое продвижение экотоксикантов по пищевым цепям, высокая их проникающая способность и биоаккумуляция в низкоминерализованных водах; - патологии и дисфункции у лососевых и сиговых рыб, снижение численности и видового разнообразия, искажение рангового доминирования; - увеличение численности эврибионтных видов и космополитов.
	Индекс заболеваемости***	≈1	2–3	

* CL – критическая нагрузка, характеризует допустимое выпадение кислых осадков на территорию водосборов и определяется как буферная емкость воды, обусловленная природным содержанием в ней катионов.

** $CLex$ – превышение критической нагрузки, определяется как разность фактического выпадения сульфат- и нитрат-анионов с атмосферными осадками и CL , но с учетом техногенных катионов, поступающих в водоем с теми же осадками.

***Индекс заболеваемости рассчитывается как доля больных рыб от общего количества рыб в выборке; учитывается также тяжесть заболевания.

Учитывая всё многообразие и особенности круговорота опасных элементов и веществ, нормативы качества вод для вод арктического бассейна должны быть более жесткими (по крайней мере, в 3–5 раз) и

быть переменными в зависимости от характеристик природного водного объекта и антропогенной нагрузки, а также сопутствующих факторов.

Литература

1. Государственные доклады «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации», 2000–2008, Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/?PAGEN_2=1&search).
2. CliC/AMAP/IASC, 2016. *The Arctic Freshwater System in a Changing Climate*. WCRP Climate and Cryosphere (CliC) Project, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), International Arctic Science Committee (IASC), DK, Odder, Gylling, Narayana Press, 2016, 26 pp. (<https://www.amap.no/documents/download/2628/inline>).
3. Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report, Norway, Oslo, AMAP, 1997, 188 pp. (<https://www.amap.no/documents/doc/arctic-pollution-issues-a-state-of-the-arctic-environment-report/67>).
4. **Т.И. Моисеенко**
Водная экотоксикология: фундаментальные и прикладные аспекты, РФ, Москва, Наука, 2009, 400 с.
5. Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение, РФ, Москва, изд-во ВНИРО, 2010, 304 с.
6. **Т.И. Моисеенко, Н.А. Гашкина, Л.П. Кудрявцева, Ю.А. Былинник, С.С. Сандимиров**
Водные ресурсы, 2006, 33(2), 163.
7. Архив погоды: Мурманская область, Справочно-информационный портал «Погода и климат». (<http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=51>).
8. **Т.И. Моисеенко, М.М. Базова, М.И. Дину, Н.А. Гашкина, Л.П. Кудрявцева**
Геохимия, 2022, 67(7), 668. DOI: 10.31857/S0016752522060036.
9. **М.М. Базова, Т.И. Моисеенко**
Геохимия, 2021, 66(10), 938. DOI: 10.31857/S0016752521100022.
10. **B. Kvæven, M.J. Ulstein, B.L. Skjelkvåle**
Water, Air, Soil Pollut., 2001, 130, 775. DOI: 10.1023/A:1013802122401.
11. **O.G. Garmo, B.L. Skjelkvåle, H.A. de Wit, L. Colombo, C. Curtis, J. Folster, A. Hoffmann**
Water, Air, Soil Pollut., 2014, 225, 1880. DOI: 10.1007/s11270-014-1880-6.
12. **A. Henriksen, I. Katari, M. Posch, A. Wilander**
Ambio, 1992, 21(5), 356. (<https://www.jstor.org/stable/4313961>).
13. **D.F. Brakke, D.H. Landers**
Environ. Sci. Technol., 1988, 22(2), 155. DOI: 10.1021/es00167a004.
14. **Т.И. Моисеенко, Н.А. Гашкина, М.И. Дину**
Загрязнение вод: уязвимость и критические нагрузки, РФ, Москва, URSS, 2017, 392 с.
15. **T.I. Moiseenko, M.I. Dinu, M.M. Bazova, H.A. de Wit**
Water, Air, Soil Pollut., 2015, 226(4), 98. DOI: 10.1007/s11270-015-2310-0.
16. **J.L. Stoddard, J. Van Sickle, A.T. Herlihy, J. Brahney, S. Paulsen, D.V. Peck, R. Mitchell, A.I. Pollard**
Environ. Sci. Technol., 2016, 50(7), 3409. DOI: 10.1021/acs.est.5b05950.
17. **K.E. Strock, S.J. Nelson, J.S. Kahl, J.E. Saros, W.H. McDowell**
Environ. Sci. Technol., 2014, 48(9), 4681. DOI: 10.1021/es404772n.
18. **Б. Хендерсон-Селлерс, Х.Р. Маркленд**
Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования, пер. с англ. под ред. К.Я. Кондратьева, Н.Н. Филатова, СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1990, 278 с.
19. **Т.И. Моисеенко, С.С. Сандимиров, Л.П. Кудрявцева**
Водные ресурсы, 2001, 28(3), 339.
20. **R.E. Carlson**
Limnol. Oceanogr., 1977, 22(2), 361. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
21. **D.T. Monteith, J.L. Stoddard, C.D. Evans, H.A. de Wit, M. Forsius, T. Hogasen, A. Wilander, B.L. Skjelkvåle, D.S. Jeffries, J. Vuorenmaa, B. Keller, J. Kopacek, J. Vesely**
Nature, 2007, 450, 537. DOI: 10.1038/nature06316.
22. **H.A. De Wit, S. Valinia, G.A. Weyhenmeyer, M.N. Futter, P. Kortelainen, K. Austnes, D.O. Hessen, A. Røike, H. Laudon, J. Vuorenmaa**
Environ. Sci. Technol. Lett., 2016, 3(12), 430. DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00396.
23. **M.D. San Clements, I.J. Fernandez, R.H. Lee, J.A. Roberti, M.B. Adams, G.A. Rue, D.M. McKnight**
Environ. Sci. Technol., 2018, 52(5), 2649. DOI: 10.1021/acs.est.7b04499.
24. **W. Rast, G. Lee**
Env. Sci. Technol., 1979, 13(7), 869. DOI: 10.1021/es60155a018.
25. **И.В. Родюшкин**
Дис. канд. геогр. наук, ИГО РАН, РФ, СПб, 1995, 161 с.
26. **Т.И. Моисеенко, М.И. Дину, Н.А. Гашкина, Т.А. Кремлева, В.Ю. Хорошавин**
Геохимия, 2020, 65(6), 521. DOI: 10.31857/S0016752520060084.
27. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 Aug. 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy, Off. J. EU, 24.08.2013, L 226/1. (<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:226:0001:0017:en:PDF>)
28. *National Recommended Water Quality Criteria, Report 4304T*, US, US EPA, 2006, 25 pp. (https://pages.mtu.edu/~asmayer/HuronCreek/old_page/WaterQuality/documents/waterqualitycriteria.pdf).
29. **K. Väinänen, M.T. Leppänen, X. Chen, J. Akkanen**
Ecotox. Environ. Saf., 2018, 147, 430. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.064.
30. **T.I. Moiseenko, N.A. Gashkina, M.I. Dinu**
Environ. Res. Lett., 2020, 15(9), 095005. DOI: 10.1088/1748-9326/ab9b40.

English

Anthropogenically Induced Processes in the Land Waters of the Arctic Regions*

Moiseenko Tatyana Ivanovna
RAS Corresponding Member, Professor
Vernadsky Institute of Geochemistry and
Analytical Chemistry, RAS
19 Kosygina Str.,
Moscow, 119991, Russia
moiseenko@geokhi.ru

Bazova Mariya Mikhailovna
Vernadsky Institute of Geochemistry and
Analytical Chemistry, RAS
19 Kosygina Str.,
Moscow, 119991, Russia
mm.bazova@yandex.ru

Abstract

The characteristics of the development of anthropogenically induced processes in the land waters of the Arctic basin, such as eutrophication, acidification and toxic pollution in a changing climate, are characterized. The main changes in ecosystems and periods of occurrence of the most dangerous situations are shown. The criteria for diagnosing adverse processes and the need to tighten water quality standards for the waters of the Arctic regions are substantiated.

Keywords: Arctic basin, land waters, eutrophication, acidification, toxic pollution, assessment criteria.

**The work was financially supported by RFBR (projects 15-29-06948 and 18-05-60012) and Federal Budget allocations (state target 0137-2019-0008).*

Images & Tables



Fig. 1. The Arctic zone and the location of the main object of research there – the Kola North: Murmansk, Nikel, Monchegorsk, Revda, Apatity.

Table 1. Distribution of the main chemical parameters of the water bodies (according to accumulated percentages) of the Kola North. Median values are highlighted in bold

Water quality indicators	Water quality indicators distribution						
	Cumulative percent						
	2.5%	10%	25%	50%	75%	90%	97.5%
<i>pH</i>	4.49	4.80	5.92	6.45	6.79	7.11	7.34
[Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +Na ⁺ +K ⁺], µeq/l	28	51	95	172	277	391	1019
<i>A/k</i> , µeq/l	<0	<0	32	79	170	266	558
[SO ₄ ²⁻], µeq/l	1	10	20	36	65	106	352
<i>DOC</i> in carbon equivalent, mg/l	2.22	3.51	4.86	7.62	11.82	17.36	26.92
[N _{tot}], µg/l	66	94	135	201	299	478	848
[P _{tot}], µg/l	1	2	3	6	10	20	49
[Mn], µg/l	1.2	1.7	2.8	12.7	24	35	49
[Fe], µg/l	25	75	145	430	920	1 600	1 820
[Zn], µg/l	0.4	0.7	1.2	1.9	3.3	4.6	7.0
[Cu], µg/l	0.3	0.6	1.5	4.3	5.5	6.8	12.9

Table 2. Hydrochemical indicators reflecting the limits of water quality changes in large lakes based on the study of background uncontaminated areas in the 1970s–1980s; physical characteristics of lakes: *S* - area, *h* - depth

Water quality indicators	Variability of water quality indicators		
	Imandra <i>S</i> =880 km ² , <i>h</i> _{max} =64 m, <i>h</i> _{av} =13.4 m	Umbozero <i>S</i> =313 km ² , <i>h</i> _{max} =115 m, <i>h</i> _{av} =32.5 m	Lovozero <i>S</i> =200 km ² , <i>h</i> _{max} =35 m, <i>h</i> _{av} =5.7 m
<i>pH</i>	6.4–7.2	6.4–7.2	6.4–7.2
O ₂ , % saturation	60–100	60–100	60–100
Salinity, mg/l	20–30	15–20	20–30
[Ca ²⁺], mg/l	1.6–4.0	1.4–1.8	1.2–2.2
[Mg ²⁺], mg/l	0.5–1.3	0.4–1.8	0.6–1.6
[Na ⁺ + K ⁺], mg/l	2.5–7.5	2.2–3.2	3.5–7.6
[HCO ₃ ⁻], mg/l	13–18	5–9	10–15
[SO ₄ ²⁻], mg/l	1.0–3.0	0.5–1.0	1.0–2.0
[Cl ⁻], mg/l	1.4–1.8	1.0–1.5	1.0–1.5
[PO ₄ ³⁻], in phosphorus equivalent, µg/l	0–8	0–2	0–18
[P _{tot}], µg/l	2–10	0–3	5–12
[N _{tot}], µg/l	10–100	10–50	10–100
[Si], mg/l	0.3–0.8	0.3–0.6	0.3–0.8
<i>DOC</i> in carbon equivalent, mg/l	3–6	2–3	4–10
[Ni], µg/l	≤1	≤1	≤1
[Cu], µg/l	1–2	≤1	1–3
[Sr], µg/l	10–30	40–60	30–50
[Al], µg/l	10–20	10–20	30–50
[Fe], µg/l	≤15	6–20	70–120
[Mn], µg/l	≤5	1–3	8–22
[Zn], µg/l	≤2	≤2	≤2

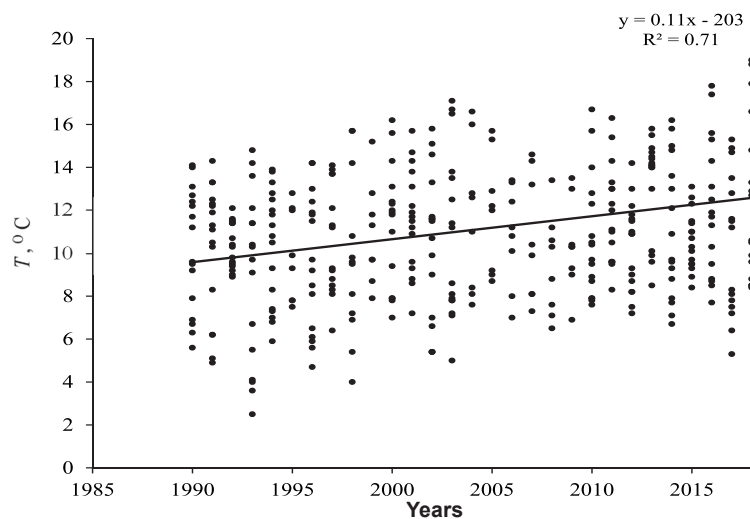


Fig. 2. Average monthly surface air temperatures during the open water period, 1990–2018.

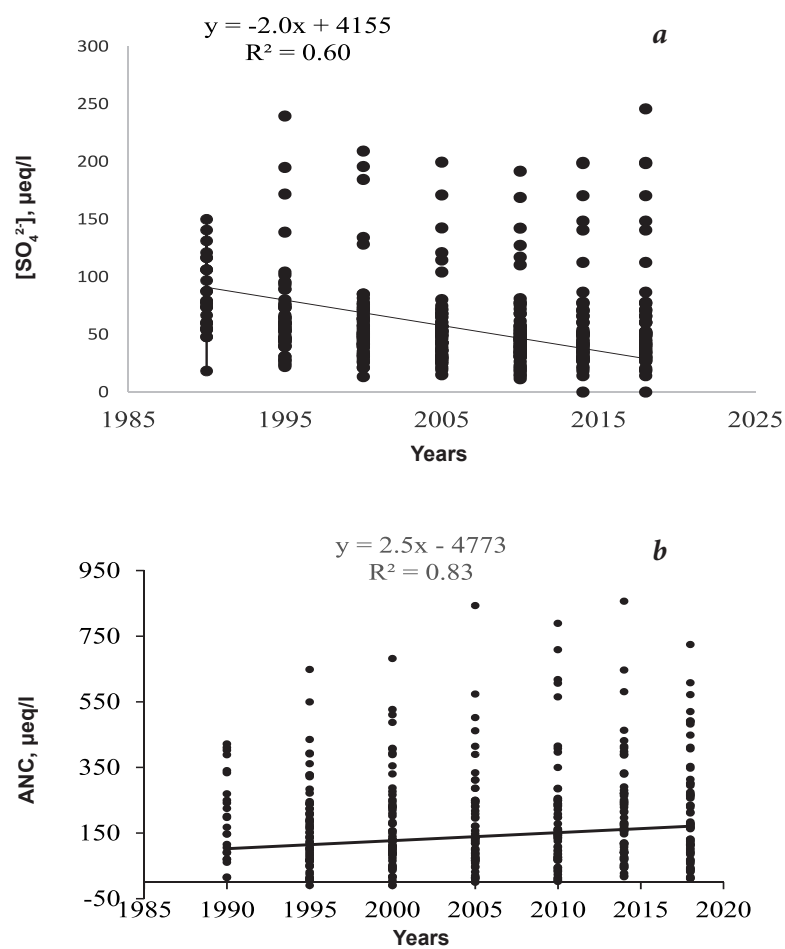


Fig. 3. Distribution of SO_4^{2-} ($\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$) and ANC ($\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$) of the water bodies in the Kola region over a 28-year period (1990–2018); $\text{SKT} = -5.85$, $p < 0.001$ and $\text{SKT} = 7.15$, $p < 0.001$.

Table 3. Trophic status of the Kola Peninsula lakes in different landscape zones [20]

Type of lake (TSI)	Number of lakes, %					
	I – tundra zone, n=15		II – forest-tundra zone, n=21		III – north taiga zone, n=32	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*
Oligotrophic (0–30)	67	13	52	0	33	0
Mesotrophic (30–50)	20	53	43	29	25	10
Eutrophic (50–70)	13	34	5	71	42	90

* Time periods: 1 – 1990–2000, 2 – 2010–2018.

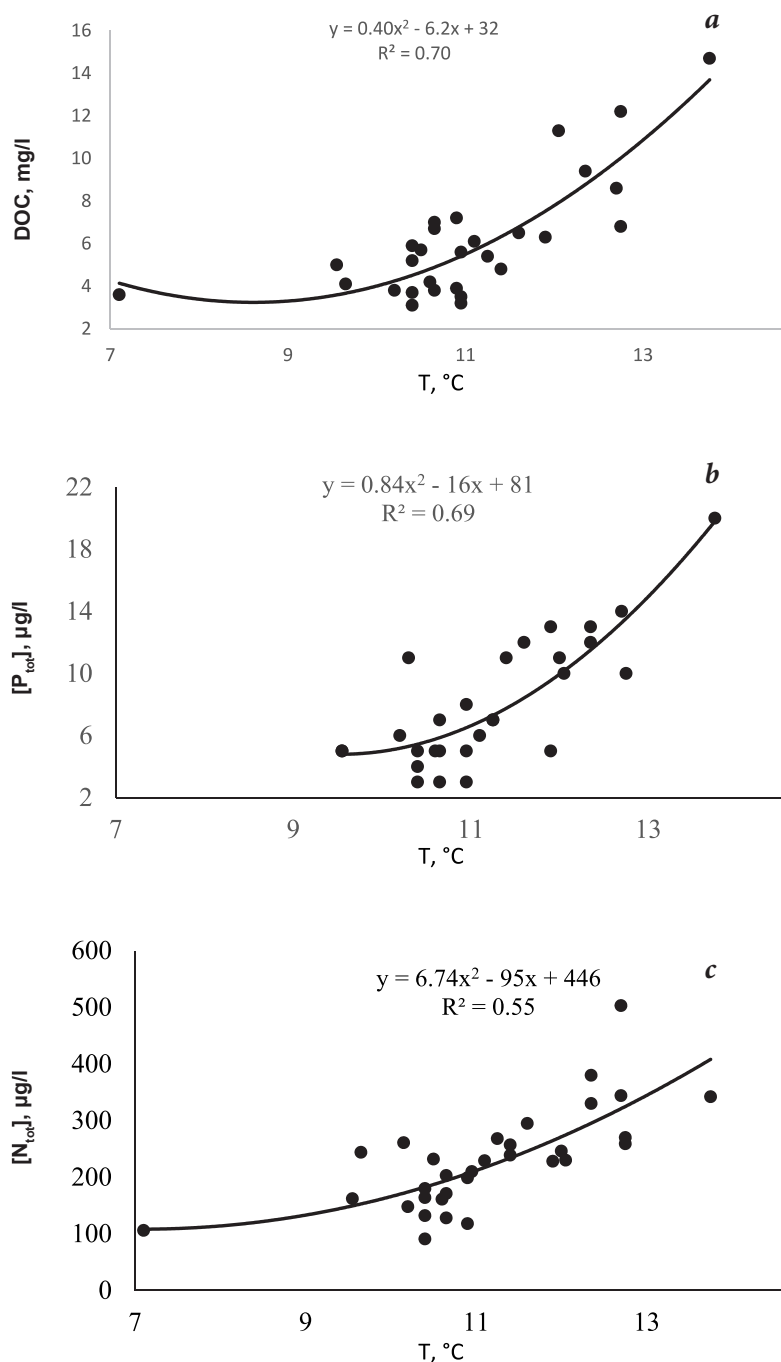
**Fig. 4.** Relationships between content of DOC in carbon equivalent (a), total phosphorus (P_{tot}) (b), total nitrogen (N_{tot}) (c) and average surface air temperature over a period 1990–2018.

Table 4. Median and limits (min–max) of variations of trace elements concentration in the small lakes in Arctic regions; the lakes under consideration are not directly polluted by waste waters

Chemical element	Chemical element concentration, µg/l		
	Kola region <i>n</i> =35	Yamalo-Nenets region <i>n</i> =52	Norilsk region <i>n</i> =12
Al	54.0 (13.7–180)	19.9 (10–310)	14.4 (<3.5–79.9)
Fe	50.0 (4.3–600)	57 (10–1474)	65.5 (<4–227)
Ti	1.79 (0.48–8.27)	<0.6(<0.6–4.8)	0.8 (<0.3–2.2)
Mn	1.6 (0.2–18.0)	6.7 (1.1–26.1)	10.8 (<3.11–37.4)
Sr	11 (4–23)	4.70 (0.70–34.8)	65.4 (13.3–115)
Zr	0.05 (<0.02–0.15)	0.03 (<0.01–0.42)	0.1 (<0.02–0.12)
Rb	0.63 (0.34–1.73)	0.37 (0.16–0.947)	0.5 (0.04–5.63)
V	0.35 (<0.02–0.76)	0.11 (<0.04–1.0)	0.4 (0.15–0.82)
Zn	0.9 (0.2–4.7)	4.33 (1.94–20.0)	4.3 (<0.30–10)
Cr	0.2 (<0.1–0.5)	0.4 (<0.4–0.5)	0.2 (<0.05–0.22)
Ce	0.29 (0.12–1.13)	0.07 (0.02–0.56)	<0.01 (<0.01–0.09)
Ni	0.9 (<0.2–5.5)	0.93 (<0.2–2.78)	4.3 (0.73–15.1)
Cu	0.7 (0.2–2.9)	2.58 (1.23–9.02)	6.3 (2.5–20.5)
Li	0.18 (0.11–0.65)	0.84 (0.32–4.14)	0.4 (0.14–1.64)
La	0.24 (0.07–0.62)	0.04 (0.02–0.17)	<0.007 (<0.007–0.04)
Co	<0.2 (<0.2–0.3)	0.06 (<0.04–0.19)	0.1 (0.03–1.02)
Pb	<0.1 (<0.1–0.6)	0.30 (0.11–3.39)	1.4 (<0.38–1.54)
Sc	0.4 (<0.1–0.8)	<0.04	no data
Sn	0.09 (0.04–0.32)	<0.01 (<0.01–0.13)	<0.01
U	0.03 (0.01–0.30)	0.04 (0.02–0.06)	<0.01 (<0.01–0.13)
As	0.1 (<0.1–0.3)	0.43 (0.10–1.56)	0.1 (<0.002–0.19)
Mo	0.14 (0.04–0.32)	0.93 (0.25–6.26)	0.1 (<0.02–0.27)
Sb	0.04 (0.01–0.13)	0.16 (0.12–0.27)	<0.01 (<0.01–0.13)
Cd	0.09 (<0.05–0.21)	0.01 (<0.01–0.08)	<0.01 (<0.01–0.04)
Bi	0.01 (<0.01–0.03)	0.45 (0.13–3.86)	<0.01

Table 5. Evaluation criteria for the anthropogenically induced processes in the waters of the Arctic Basin and features of the processes manifestation

Processes	Evaluation criteria	Process Development Thresholds	Critical (dangerous) values	Proven negative effects on aquatic ecosystems
Eutrophication	BOD_5 , mg/l	5	>30	- Development of oxygen deficiency in the polar winter; - two peaks of waters “bloom” – in April under ice and at the end of July – August; - a decrease in species diversity, including the steady and massive development of cryptophyte algae and blue-green algae at the peak of bloom; - a decrease in the number of typical northern species and biodiversity loss.
	$[P_{tot}]$, $\mu\text{g/l}$	10	>90	
	$[Chla]$, mg/m^3	4	>50	
	$[P_{tot}]/DOC$	>600	<150	
Acidification	pH	<6.5	<5.5	- The death of organisms during the development of «pH-shock» and rapid floods; - the development of acid-resistant mosses; - the predominance of acidophilic species in phyto- and zooplankton; - reducing biodiversity due to a decrease in the number of amphipods, gastropods, mayfly nymphs and stoneflies. Amphipod, a typical inhabitant of the natural oligotrophic waters of the Arctic Basin, is not found in water with $pH < 6.5$.
	ANC , $\mu\text{eq/l}$	50	<20	
	CL^* , $\text{mg-eq/m}^2\cdot\text{year}$ in vulnerable regions	>20	0–20	
	$CLex^{**}$, $\text{mg-eq/m}^2\cdot\text{year}$	0–20	>0	
Toxic pollution	Share of fish with pathologies, %	<1–3	10–15	- The “shock dose” generation during the flood period; - a high near-bottom concentration gradient of toxic elements during the polar winter; - the rapid advancement of ecotoxins through food chains, their high penetrating ability and bioaccumulation in low-mineralized waters; - pathologies and dysfunctions in salmon and whitefish, decrease in abundance and species diversity, distortion of rank dominance; - increase in the abundance of eurybiont species and cosmopolitan.
	Incidence index ^{***}	≈ 1	2–3	

* CL – the critical load, characterizes the allowable acid precipitation on the catchment area and is defined as the buffer capacity of water, due to the natural content of cations in it.

** $CLex$ – an excess of the critical load, defined as the difference between the actual precipitation of sulfate and nitrate anions with atmospheric precipitation and CL , but taking into account technogenic cations entering the lake with the precipitation.

*** The incidence index is calculated as the proportion of sick fish in the total number of fish in the sample; also takes into account the severity of the disease.

References

1. State Reports "On State and Protection of the Environment of the Russian Federation" [Gosudarstvennye doklady «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii», 2000–2008, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (in Russian). (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/?PAGEN_2=1&search).
2. CliC/AMAP/IASC, 2016. *The Arctic Freshwater System in a Changing Climate*. WCRP Climate and Cryosphere (CliC) Project, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), International Arctic Science Committee (IASC), DK, Odder, Gylling, Narayana Press, 2016, 26 pp. (<https://www.amap.no/documents/download/2628/inline>).
3. Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report, Norway, Oslo, AMAP, 1997, 188 pp. (<https://www.amap.no/documents/doc/arctic-pollution-issues-a-state-of-the-arctic-environment-report/67>).
4. T.I. Moiseenko *Aquatic Ecotoxicology: Fundamental and Applied Aspects [Vodnaya ekotoksikologiya: fundamentalnye i prikladnye aspekty]*, RF, Moscow, Nauka Publ. House, 2009, 400 pp. (in Russian).
5. List of Fishery Standards for Maximum Allowable Concentrations (MPC) and Indicative Safe Levels of Exposure (SLI) of Harmful Substances for the Water Bodies of Fishery Importance [Perechen rybokhozyaystvennykh normativov predelno-dopustimyykh koncentraciy (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovney vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh obektov, imeyushchikh rybokhozyaystvennoe znachenie], RF, Moscow, VNIRO Publishing House, 2010, 304 pp. (in Russian).
6. T.I. Moiseenko, N.A. Gashkina, Yu. A. Bylinyak, L.P. Kudryavtseva, S.S. Sandimirov *Water Resources*, 2006, **33**(2), 144. DOI: 10.1134/S0097807806020047.
7. Weather Archive: Murmansk Region, Reference and Information Portal "Weather and Climate" [Arkhiv pogody: Murmanskaya oblast, Spravochno-informatsionnyy portal "Pogoda i klimat"] (in Russian). (<http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=51>).
8. T.I. Moiseenko, M.M. Bazova, M.I. Dinu, N.A. Gashkina, L.P. Kudryavtseva *Geochem. Int.*, 2022, **60**(7), 685. DOI: 10.1134/S0016702922060039.
9. M.M. Bazova, T.I. Moiseenko *Geochem. Int.*, 2021, **59**(10), 970. DOI: 10.1134/S0016702921100025.
10. B. Kvaeven, M.J. Ulstein, B.L. Skjelkvåle *Water, Air, Soil Pollut.*, 2001, **130**, 775. DOI: 10.1023/A:1013802122401.
11. O.G. Garmo, B.L. Skjelkvåle, H.A. de Wit, L. Colombo, C. Curtis, J. Folster, A. Hoffmann *Water, Air, Soil Pollut.*, 2014, **225**, 1880. DOI: 10.1007/s11270-014-1880-6.
12. A. Henriksen, I. Kamari, M. Posch, A. Wilander *Ambio*, 1992, **21**(5), 356. (<https://www.jstor.org/stable/4313961>).
13. D.F. Brakke, D.H. Landers *Environ. Sci. Technol.*, 1988, **22**(2), 155. DOI: 10.1021/es00167a004.
14. T.I. Moiseenko, N.A. Gashkina, M.I. Dinu *Acidification of Water: Vulnerability and Critical Loads [Zakislennie vod: uyazvimost i kriticheskie nagruzki]*, RF, Moscow, URSS Publ., 2017, 392 pp. (in Russian).
15. T.I. Moiseenko, M.I. Dinu, M.M. Bazova, H.A. de Wit *Water, Air, Soil Pollut.*, 2015, **226**(4), 98. DOI: 10.1007/s11270-015-2310-0.
16. J.L. Stoddard, J. Van Sickle, A.T. Herlihy, J. Brahney, S. Paulsen, D.V. Peck, R. Mitchell, A.I. Pollard *Environ. Sci. Technol.*, 2016, **50**(7), 3409. DOI: 10.1021/acs.est.5b05950.
17. K.E. Strock, S.J. Nelson, J.S. Kahl, J.E. Saros, W.H. McDowell *Environ. Sci. Technol.*, 2014, **48**(9), 4681. DOI: 10.1021/es404772n.
18. B. Henderson-Sellers, H.R. Markland *Decaying Lakes. The Origins and Control of Cultural Eutrophication*, UK, Chichester, Wiley, 1987, 254 pp. DOI: 10.2134/jeq1989.00472425001800010030x.
19. T.I. Moiseenko, S.S. Sandimirov, L.P. Kudryavtseva *Water Resources*, 2001, **28**(3), 307. DOI: 10.1023/A:1010404908568.
20. R.E. Carlson *Limnol. Oceanogr.*, 1977, **22**(2), 361. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
21. D.T. Monteith, J.L. Stoddard, C.D. Evans, H.A. de Wit, M. Forsius, T. Hogasen, A. Wilander, B.L. Skjelkvåle, D.S. Jeffries, J. Vuorenmaa, B. Keller, J. Kopacek, J. Vesely *Nature*, 2007, **450**, 537. DOI: 10.1038/nature06316.
22. H.A. De Wit, S. Valinia, G.A. Weyhenmeyer, M.N. Futter, P. Kortelainen, K. Austnes, D.O. Hessen, A. Råike, H. Laudon, J. Vuorenmaa *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 2016, **3**(12), 430. DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00396.
23. M.D. San Clements, I.J. Fernandez, R.H. Lee, J.A. Roberti, M.B. Adams, G.A. Rue, D.M. McKnight *Environ. Sci. Technol.*, 2018, **52**(5), 2649. DOI: 10.1021/acs.est.7b04499.
24. W. Rast, G. Lee *Env. Sci. Technol.*, 1979, **13**(7), 869. DOI: 10.1021/es60155a018.
25. I.V. Rodyushkin *PhD Thes. (Geograph. Sci.) [Dissertation for the degree of a Candidate of Geographical Sciences]*, INOZ RAS, RF, St. Petersburg, 1995, 161 pp. (in Russian).
26. T.I. Moiseenko, M.I. Dinu, N.A. Gashkina, T.A. Kremleva, V.Yu. Khoroshavin *Geochem. Int.*, 2020, **58**(6), 613. DOI: 10.1134/S0016702920060087.
27. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 Aug. 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy, Off. J. EU, 24.08.2013, L 226/1. (<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:226:0001:0017:en:PDF>).
28. National Recommended Water Quality Criteria, Report 4304T, US, US EPA, 2006, 25 pp. (https://pages.mtu.edu/~asmayer/HuronCreek/old_page/WaterQuality/documents/waterqualitycriteria.pdf).
29. K. Väänänen, M.T. Leppänen, X. Chen, J. Akkanen *Ecotox. Environ. Saf.*, 2018, **147**, 430. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.064.
30. T.I. Moiseenko, N.A. Gashkina, M.I. Dinu *Environ. Res. Lett.*, 2020, **15**(9), 095005. DOI: 10.1088/1748-9326/ab9b40.

Современная эколого-экономическая ситуация и общественное здоровье в арктической зоне Республики Саха (Якутия)*

Н.Г. Степанько, С.А. Лозовская, В.Г. Шведов

Статья посвящена рассмотрению основных параметров загрязнения окружающей среды Арктической зоны Республики Саха (Якутия) (АЗРС), а также анализу их влияния на состояние здоровья населения этого региона. Собранные данные указывают, что основным источником загрязнителей в данном случае является горнодобывающая промышленность, дополнительными – энергетическое хозяйство, транспорт и оленеводство. Их отрицательное воздействие усиливают такие естественные особенности региональной природной среды, как медленное разложение поллютантов из-за годового преобладания низких температур и, благодаря наличию многолетней мерзлоты, их концентрация в верхних слоях почвы. В результате проведенного исследования состояния здоровья населения АЗРС определен основной состав региональных патологий, составлена территориальная картина заболеваемости населения региона. Дана оценка состояния регионального здравоохранения и сформулированы некоторые предложения по повышению эффективности его работы.

Ключевые слова: АЗРС, эколого-экономическая обстановка, загрязнение окружающей среды, общественное здоровье, система здравоохранения.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60103) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №116110810013-5).*

Введение

Арктическую зону Республики Саха (Якутия) (далее – Якутия) составляют 13 административных районов (улусов) – Абыйский, Аллаховский, Анабарский, Булунский, Верхнеколымский, Верхоянский, Жиганский, Момский, Нижнеколымский, Оленёкский, Среднеколымский, Усть-Янский, Эвено-Бытантайский. Здесь сосредоточены стратегически важные минеральные ресурсы – углеводороды, алмазы, благородные и редкоземельные металлы. Омывающий ее с востока Берингов пролив является естественным коридором кратчайшего морского пути между Европой и Азиатско-Тихоокеанским регионом.

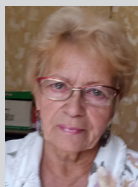
Вместе с тем, природно-климатические условия АЗРС экстремальны для жизни и деятельности человека. Кроме того, кризис конца XX в.

привел к упадку региональной промышленности и ликвидации большинства социальных гарантий для местного населения. Результатом консолидированного проявления всех этих обстоятельств стала депопуляция региона: в 1990 г. здесь проживало более 305.5 тыс. человек, а в 2017 г. – уже 117.5 тыс. Данную ситуацию следует признать крайне негативной и требующей мер по ее исправлению. В этой связи основными задачами проведенного нами исследования явились:

- рассмотрение эколого-экономической обстановки в АЗРС в связи с антропогенным загрязнением природной среды региона;
- анализ сложившегося в этом регионе фона общественного здоровья и выявление его основных характеристик;
- определение основных проблем региональной системы здравоохранения и предложение мер по их устранению.

Материалы и методы

Базовыми материалами явились: тематические научные источники, данные Росстата за 2000–2019 гг.,



СТЕПАНЬКО
Наталья Григорьевна
Тихоокеанский институт
географии ДО РАН



ЛОЗОВСКАЯ
Светлана Артемьевна
Тихоокеанский институт
географии ДО РАН



ШВЕДОВ
Вячеслав Геннадьевич
Тихоокеанский институт
географии ДО РАН

результаты полевых экспедиций авторов. При ее подготовке использованы методы: общий географический и медико-географический анализ, выборочно-статистический, картографический, геоинформационный, эколого-эпидемиологический, метод районирования и типологии территорий.

Результаты и обсуждение

Анализ социально-экономического состояния АЗРС показывает тенденцию роста многих показателей: валового регионального продукта, промышленного и сельскохозяйственного производства и т. д. [1–6]. Вырос и объем средств, направленных на охрану окружающей среды (ООС). Однако его сравнение с динамикой прироста валового регионального продукта показывает, что его величина недостаточна для нейтрализации или заметного снижения антропогенной нагрузки на природу региона (рис. 1).

Из таблицы 1 видно, что промышленные очаги имеются в большинстве административных единиц АЗРС. Они размещены точно, но относятся к отраслям с высокой степенью загрязнения природной среды, которое интенсивно проявляет себя в арктических экосистемах, обладающих низкой устойчивостью к антропогенному воздействию. В соответствии с результатами ранее проведенных исследований [7], воздействие промышленного производства на окружающую среду (как одного из основных ее загрязнителей) можно свести к следующим показателям: загрязнению вод, атмосферного воздуха и нарушению земель.

Коэффициент загрязнения воздуха в различных пунктах взятия проб варьировал в пределах от 0.3 до 0.5 [8]. То есть его уровень в приземном слое атмосферы на исследуемой территории примерно одинаков и в целом может быть оценен как неблагоприятный.

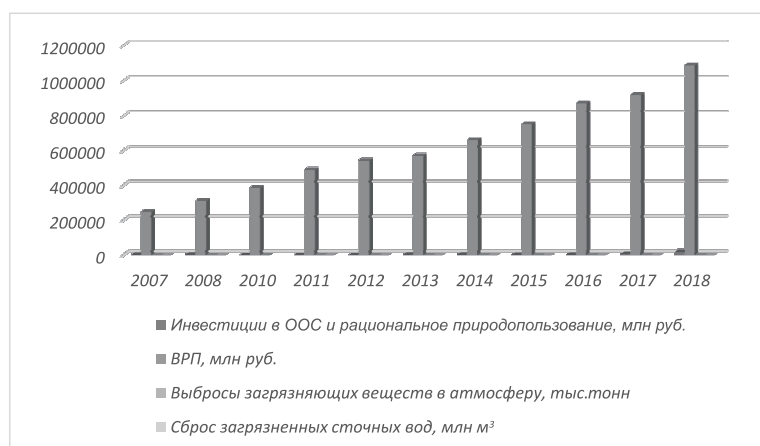


Рис. 1. Соотношение некоторых эколого-экономических показателей в Республике Саха (Якутия).

По уровню загрязненности внутренних вод АЗРС занимает промежуточное положение среди регионов Дальнего Востока, и в целом состояние водоемов оценивается как удовлетворительное.

Показатель степени нарушения почвенного покрова указывает, что темп его роста существенно превышает показатель восстановления земель. Это расхождение возникло вследствие замедленного самовосстановления почв и фактического отсутствия работ по их рекультивации.

Индустриальное загрязнение земель АЗРС дополняется результатами перевыпаса домашних животных. Чрезмерная нагрузка на пастбищные угодья привела к сокращению площадей под лишайниками и кустарниками. Выбивание и стравливание растительности оленями влечет за собой деградацию почв и развитию мерзлотных процессов.

Наибольшее разрушение земель связано с добычей россыпного золота по поймам рек и ручьев. Здесь бульдозеры, драги и экскаваторы уничтожают верхние слои толщиной от 3 до 15 м [9]. В результате пойменные участки заполняются отвалами, которые быстро сковывает мерзлота, делая их непригодными для рекультивации.

Суммарный показатель загрязнения – важный ограничитель хозяйственной деятельности, как в целом, так и по отдельным отраслям на определенной территории [8]. В АЗРС параметры его воздействия на природную среду не обнаруживают тенденцию к снижению. Природоохранная деятельность в этом регионе остается на низком уровне. Ее финансирование из года в год остается стабильно мизерным и не соответствует региональному экономическому оптимуму. На это указывает индекс экономической достаточности природоохранной деятельности (ИЭД) [8, 10] – соотношение фактического объема финансирования охраны окружающей среды и экономического оптимума. Из таблицы 2 и рисунка 2 видно, что темп увели-

Таблица 1. Дифференциация хозяйственной деятельности арктических улусов Якутии

Районы (улусы)	Основные виды хозяйственной деятельности	Возможные перспективные виды хозяйственной деятельности	Классы вредности производств (существующих и возможных)
Аллаиховский	Оленеводство; пушной и рыбный промыслы; рыбопереработка; пищевая (молочная) промышленность	Добыча золота, мамонтового бивня; реинтродукция овцебыка; оленеводство; рыбный и охотничий промысел; пищевая промышленность; кожевенно-меховое производство	IV, V
Анабарский	Добыча и обогащение алмазов; охота; рыболовство; оленеводство; производство сувениров; авиаперевозки (пассажирские и грузовые); добыча мамонтового бивня	Добыча алмазов, угля, битумов; реинтродукция овцебыка; оленеводство; рыбный и охотничий промысел; пищевая промышленность; кожевенно-меховое, сувенирное производства	II, IV, V
Булунский	Оленеводство; рыбный и пушной промыслы; портовое хозяйство (морской торговый порт Тикси); аэропорт	Добыча алмазов, угля, мамонтового бивня; реконструкция порта Тикси; реинтродукция овцебыков; оленеводство; рыбный и охотничий промысел; пищевая промышленность; кожевенно-меховое производство	III, V
Усть-Янский	Добыча олова и золота; рыбопереработка; оленеводство и звероводство; авиаперевозки	Добыча золота, олова, угля, мамонтового бивня; оленеводство; рыбный и охотничий промысел; пищевая промышленность, кожевенно-меховое производство	II, IV, V
Нижнеколымский	Оленеводство; звероводство и пушной и рыбный промыслы; рыбопереработка; дорожное строительство; портовое хозяйство («Зеленомысский речной порт»); аэропорт	Строительство автодороги; ТЭС; добыча угля; реконструкция порта «Зеленый Мыс»; оленеводство, рыбный и охотничий промысел; пищевая промышленность; кожевенно-меховое производство	III, IV, V

Таблица 2. Динамика эффективности природоохранной деятельности в Якутии

Годы	Сумма текущих затрат + инвестиции в основной капитал на ООС и рациональное природопользование, млн руб.	Экономический оптимум млн руб. (8% от ВРП) [11]	ВРП, млн руб.	Индекс экономической достаточности (ИЭД) природоохранной деятельности (факт/оптимум)
2013	4 889.7	45 530.5	569 131.6	0.10
2014	10 772.3	52 812.0	660 150.0	0.20
2015	10 314.8	59 999.0	749 987.5	0.20
2016	13 295.0	69 488.6	868 607.0	0.19
2017	11 667.2	73 321.5	916 518.6	0.16

чения ИЭД в Республике Саха в целом, и, соответственно, в ее арктической зоне незначителен и пото-

му не влияет на ситуацию в области охраны окружающей среды.

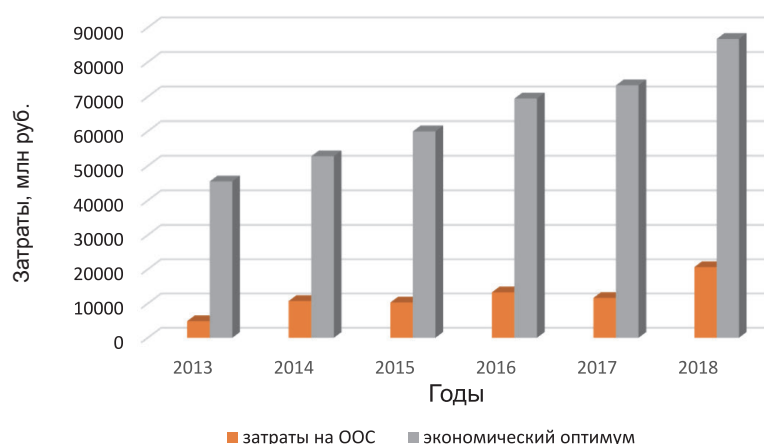


Рис. 2. Соотношение фактических и необходимых затрат на охрану окружающей среды.

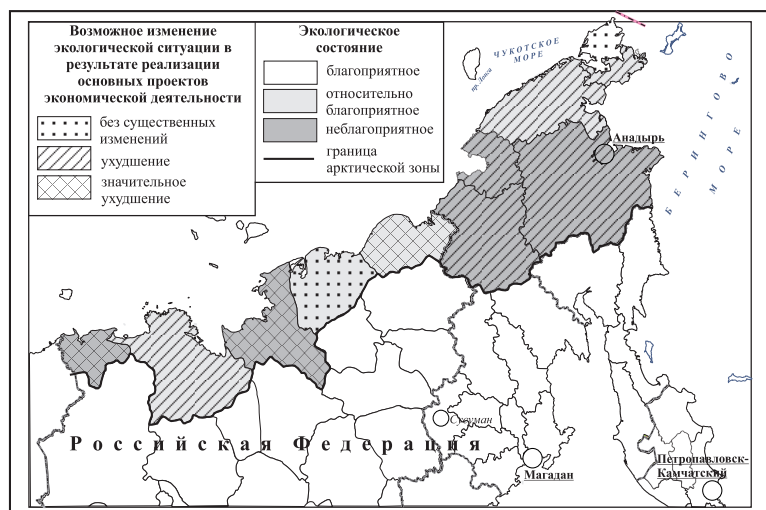


Рис. 3. Экологическое состояние административных субъектов на северо-востоке России и прогноз его возможного изменения.

Оценивая перспективы развития данной территории, необходимо отметить, что в обозримом будущем отраслью специализации АЗРС останется горнодобывающая промышленность. Это означает,

что ее воздействие на природную среду региона будет возрастать. Несмотря на то, что предполагается ряд проектов по сохранению природы и восстановлению нарушенных территорий (в таблице 3 указаны наиболее крупные из них), ситуация со сбережением окружающей среды здесь вряд ли улучшится, поскольку на изучаемой территории приоритет отдается экономическим интересам.

Учитывая эти обстоятельства, в АЗРС можно выделить наиболее проблемные территории: Анабарский, Булунский и Усть-Янский улусы (рис. 3). Именно их территория в наибольшей степени подвержена антропогенному воздействию, которое, согласно плану развития АЗРС, будет лишь усиливаться.

Данная ситуация является одной из причин крайне нестабильной ситуации по заболеваемости и смертности в АЗРС. В основном смертность среди населения региона приходится на сердечно-сосудистые заболевания (41.8%), новообразования (15.3%) и внешние причины (20.7%). С 2000 по 2018 гг. заболеваемость здесь возросла на 33.4% (в целом по Республике Саха – на 23.8%, по России – на 6.6%) (рис. 4).

Наиболее неблагоприятна обстановка в Усть-Янском, Среднеколымском, Эвено-Бытантайском, Нижнеколымском, Аллаиховском улусах,

Таблица 3. Основные инвестиционные проекты в Якутии (по [12])

Проекты экономической направленности	Проекты экологической направленности
«Минерально-сырьевой промышленный кластер (МСПК) «Усть-Яна»; - освоение Томторского месторождения; - освоение месторождений углеводородного сырья на шельфе Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых; - создание Чаун-Билибинского энергоузла; - реконструкция портовой инфраструктуры АО «Морской порт «Тикси»»; - реконструкция портовой инфраструктуры ООО «Зеленомысский речной порт»; «Тепло Арктики»; «Морской десант»; «Арктический мрамор»; «Дары дикой Арктики».	«Эффективное обращение с отходами»; «Чистая Арктика»; «Прозрачная среда»; «Защита животного мира»; «Модельные территории КМНС»; «Комплексное развитие северного (домашнего) оленеводства»; «Ресурсы будущего рыбного промысла»; - эффективные автономные источники теплоэнергии.

где заболеваемость за 2000–2018 гг. возросла на 40–60% (рис. 5).

Структура заболеваемости в АЗРС типична для общереспубликанской (рис. 6). К 2018 г. в ней преобладали болезни органов дыхания (53,4%). С 2000 по 2018 гг. заболеваемость ими в Республике Саха возросла на 40,3%. Далее следуют травмы, отравления и иные внешние причины (11,1%), осложнения беременности, родов и послеродового периода (5,8%), заболевания органов пищеварения (5,5%), кожи и подкожной клетчатки (4,9%). Проведенное анкетирование позволяет сделать вывод, что заболевания органов пищеварения напрямую связаны с использованием «ледяной воды» (оттаянный лед рек), которую местное население считает наиболее чистой и отдает ей предпочтение в использовании в пищу. На самом деле в ней присутствует много различных загрязнителей, так как, попадая со сточными водами (очистка отсутствует практически во всех улусах), вредные вещества не успевают оседать ввиду замедленности всех естественных природных процессов. Схожая структура заболеваемости свойственна и АЗРС. Отличия состоят в том, что здесь с 2000 г. отмечено улучшение ситуации по инфекционным и паразитарным заболеваниям на фоне роста уровня распространения болезней пищевого тракта.

Пространственная дифференциация улусов АЗРС по заболеваемости населения достаточно неоднородна. Наиболее напряженная ситуация сложилась в восточных районах региона (Аллайховский, Абыйский, Момский, Верхнеколымский, Среднеколымский, Нижнеколымский). Уровень выше среднего имеется в Жиганском и Оленёкском районах. В Булунском и Усть-Янском улусах, несмотря на относительно благополучную обстановку, имеется тенденция к быстрому росту заболеваемости. Некоторое улучшение ситуации отмечено в Верхоянском, Бу-

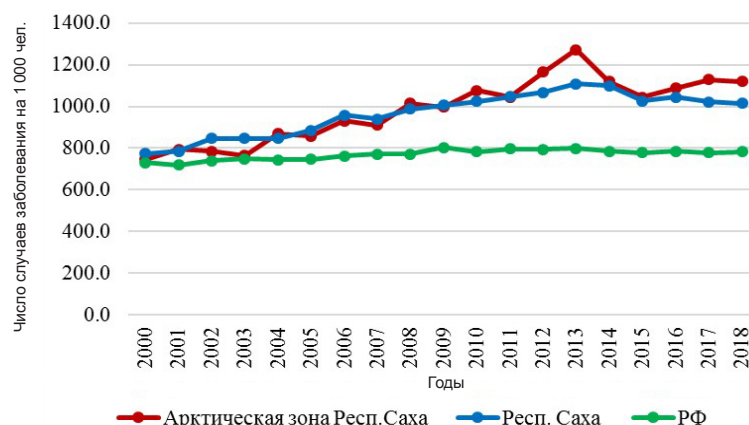


Рис. 4. Сравнительная динамика заболеваемости населения АЗРС, Республики Саха и Российской Федерации в целом в 2000–2018 гг., всего случаев на 1 000 человек населения.

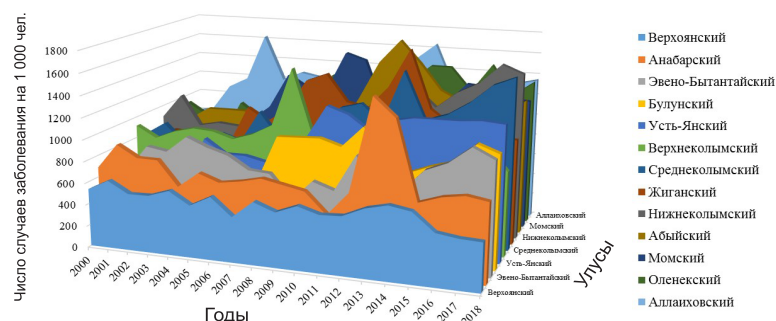


Рис. 5. Динамика заболеваемости населения АЗРС в 2000–2018 гг. с распределением по суммарным значениям заболеваемости на 1 000 человек.

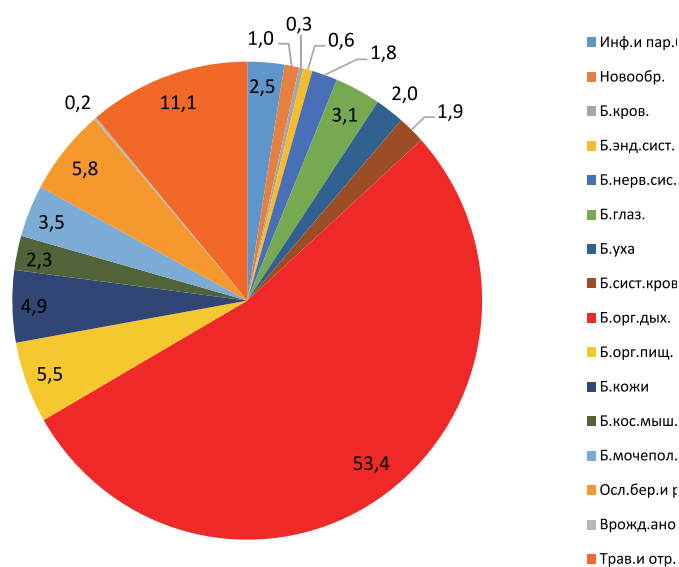


Рис. 6. Структура первичной заболеваемости всего населения Республики Саха (Якутия) к 2018 г., %.

лунском, Анабарском районах. Но в целом динамика заболеваемости населения АЗРС показывают общий негативный фон с незначительными колебаниями в сторону положительных изменений.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Для АЗРС в целом характерны следующие экологические проблемы:

- плохое качество питьевой воды;
- загрязнение водотоков промышленными сбросами;
- наличие несанкционированных свалок твердых отходов;
- отсутствие утилизации твердых отходов;
- нарушение почв в результате промышленной и сельскохозяйственной деятельности;
- слабое развитие средоохранного направления природопользования.

2. Между улусами АЗРС сформировались следующие различия:

- для них в большинстве, за исключением Анабарского и Усть-Янского улусов, характерно преобладание традиционных видов хозяйственной деятельности;
- усиление в структурных направлениях природопользования наиболее актуально для Анабарского и Усть-Янского улусов.

Региональная экологическая обстановка безусловно является одним из факторов процесса депопуляции, снижая продолжительность жизни и репродуктивные способности людей, способствуя их отъезду с экологически неблагоприятной территории. При этом состояние здоровья населения, в свою очередь, – индикатор и критерий оценки качества окружающей среды [13, 14].

В принципе, данная проблематика не уникальна. Но в условиях Заполярья она сочетается с другими, не менее негативными для здоровья, условиями. В их числе следует назвать отрицательное воздействие низких температур, дискомфортный режим фотопериодичности с полугодовой сменой дня и ночи, неблагоприятные ветровой и барический фоны, магнитные бури. Из-за этого среди населения АЗРС часты обморожения, простуды, гипер- и гипотонических расстройства, сбои в работе сердечно-сосудистой системы и желёз внутренней секреции, аллергические расстройства, заболевания туберкулезом. Сочетание этих провоцируемых природной средой региона заболеваний с патологиями техногенного происхождения создает крайне сложную медико-биологическую обстановку [15].

Актуальны и медицинские проблемы, обусловленные особенностями питания жителей АЗРС. Ее возможности в самообеспечении продовольствием ограничены. Поэтому основной его объем доставляется Северным завозом. Логистика его внешней транспортировки, в общих чертах, оптимальна. Главная проблема состоит во внутреннем распределении грузов.

Территория АЗРС на 80% труднодоступна для транспорта и лишена оборудованной и постоянно действующей коммуникационной сети. Поэтому

доставка продуктов питания в пределах региона может запаздывать на срок до восьми месяцев и более, что становится причиной их просроченности. Отдельный аспект продовольственной проблемы региона – деформация традиционного продуктового рациона коренного населения, в котором значительно возросла доля углеводов. Общие последствия этих негативов – распространение среди жителей АЗРС, независимо от их этнической принадлежности, неинфекционных заболеваний: ожирения, атеросклероза, артериальной гипертензии, сахарного диабета, авитаминоза, функциональных расстройств желёз внутренней секреции.

Ситуация усугублена тем, что имевшаяся в СССР централизованная система здравоохранения на северных территориях в настоящее время практически утрачена, и на смену ей пришел курс на ликвидацию малых медицинских учреждений, сокращение низшего и среднего лечашего персонала.

В АЗРС показатель обеспеченности населения медработниками из расчета на 10 тыс. жителей за 2000–2017 гг. увеличился: по сестринско-фельдшерскому персоналу он возрос с 127.5 специалистов до 131.9, а по врачам – с 37.75 до 43.5. Но этот позитив обусловлен не увеличением числа медицинских работников, а убылью населения в регионе. Об этом свидетельствует тот факт, что нормативное обеспечение арктических районов врачами на 30%, а фельдшерами и санитарями – на 8.5% ниже, чем в целом по Республике Саха. За этот период число медицинских учреждений в регионе сократилось вдвое [16], а стационарных мест лечения – с 2 597 до 1 239. Эти изменения не могли не сказаться на качестве оказания лечебной помощи из-за возросшей на работников здравоохранения физической нагрузки: если в 2000 г. врач за одну рабочую смену обслуживал 400 обращений за помощью, то в

2017 г. – 490. Отражением неудовлетворительного состояния системы здравоохранения в АЗРС служит следующий показатель: продолжительность жизни людей в регионе на пять лет меньше, чем в среднем по Российской Федерации.

В этих условиях оптимальным средством доставки медицинской помощи в отдаленные населенные пункты представлялась малая авиация. Но она обладает рядом недостатков – сильной зависимостью от погоды и высокой затратностью: ежегодное финансирование республиканского бюджета на ее содержание составляет 1 млрд руб. [17]. Это требует рассмотрения возможности поиска иных способов оказания врачебной помощи жителям отдаленных поселений; в первую очередь – восстановления в них здравоохранительных учреждений (участковых больниц, фельдшерско-акушерских пунктов, женских консультаций и др.).

Однако это процесс не может быть скоротечным. По этой причине ему должно предшествовать создание мини-здравпунктов с несколькими местами больничного стационара и центром консультационного обслуживания амбулаторных больных. При этом такие пункты должны быть оснащены не только препаратами и лечебным оборудованием, но и средствами компьютерной связи. Это необходимо для организации системы телемедицины – консилиумов с удаленными специалистами и их прямого контакта с пациентами. Улучшить ситуацию призвано решение об увеличении оплаты труда всем категориям медработников за счет республиканского бюджета. Но очевидно, что эта мера должна сопровождаться серьезным организационным и техническим подкреплением, учитывающим суровые природно-климатические реалии

региона, его транспортные проблемы и очаговость размещения населения.

Заключение

АЗРС – территория с большими возможностями для экономического роста. Но ее природная среда не обладает большим запасом прочности перед антропогенным воздействием. Поэтому дальнейшее усиление хозяйственной деятельности резко усилит деградацию окружающей среды региона, что, в конечном итоге, неизбежно отразится на здоровье местного населения. В этой связи остро стоит вопрос о разработке и внедрении в практику мероприятий, направленных на ускоренное развитие действий по природоохранной деятельности и по сохранению общественного здоровья, в том числе в первую очередь:

- составление и реализация проектов по направлениям природоохранной и ресурсосберегающей деятельности, государственная поддержка традиционных видов хозяйствования;
- рекультивация земель, подвергшихся техногенному воздействию, ликвидация несанкционированных свалок, утилизация или вторичное использование отходов производства в соответствии с действующими санитарно-нормативными правилами;
- возведение новых и реконструкция действующих объектов водоснабжения и водоотвода;
- создание комплексной медико-географической картины региона с целью разработки адресных мер по оздоровительным мероприятиям для населения региона;
- восстановление ранее действовавшей структуры регионального здравоохранения на адаптированной к местным условиям организационно-технической основе.

Для реализации этих мероприятий необходимы:

- заинтересованный подход и оказание реальной помощи государственными и региональными органами управления;
- внедрение системы налоговых льгот и иных преференций для тех хозяйствующих субъектов, которые осуществляют природоохранные действия и используют природосберегающие технологии;
- осуществление масштабного изучения состояния общественного здоровья в АЗРС и формирование предложений по его улучшению.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2017 году», РФ, Якутск, Изд. Министерства экологии Республики Саха (Якутия), 2018, 571 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году», РФ, Москва, НИИ-Природа, 2017, 760 с.
3. Основные показатели охраны окружающей среды: Статистический бюллетень, РФ, Москва, Росстат, 2006, 93 с.
4. Регионы России. Социально-экономические показатели за 2016 год, РФ, Москва, Росстат, 2016, 1326 с.
5. Регионы России. Социально-экономические показатели за 2019 год, РФ, Москва, Росстат, 2019, 1204 с.
6. Статистический ежегодник Республики Саха (Якутия), РФ, Якутск, Территориальный орган федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия), 2017, 704 с.
7. **Н.Г. Степанько**
Вестник Том. гос. ун-та, 2013, №368, 173.
8. **Н.Г. Степанько**
В Сб. Природно-ресурсные и экологические факторы в развитии территориальных хозяйственных структур, под ред. Н.Г. Степанько, А.В. Мошкова, РФ, Владивосток, Дальнаука, 2012, с. 99–111.
9. **Н.С. Картамышева, И.А. Вахрушин, М.Н. Перевала, Ю.В. Трескова**
Молодой ученый, 2015, №13(93), 845.
10. **Степанько Н.Г.**
Успехи современного естествознания, 2017, №4, 120.
11. **С.И. Колесников**
Экономика природопользования, РФ, Ростов-на-Дону, изд. Ростовского государственного университета, 2000, 40 с.
12. Стратегия социально-экономического развития Арктической зоны Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года, РФ, Якутск, изд. Правительства Республики Саха (Якутия), 2019, 107 с.
13. **А.Б. Косолапов**
Здоровье населения Дальнего Востока, РФ, Владивосток, Дальнаука, 1996, 350 с.
14. **С.А. Лозовская, Н.Г. Степанько, Е.В. Изергина**
Фундаментальные исследования, 2014, №5(часть 6), 1334.
15. Якутия обозначила главные проблемы доступности медпомощи в северных районах, ИА Regnum, 27.05.2016. (<https://regnum.ru/news/2137582.html>).
16. **Н.М. Гоголев, Т.Е. Бурцева, С.Л. Аврусин, Л.Н. Мельникова, Т.В. Батилова, В.Г. Часнык**
Педиатр, 2019, 10(4), 61.
DOI: 10.17816/PED10461-66.
17. **Д.Г. Тихонов**
Арктическая медицина, РФ, Якутск, изд. ЯНЦ СО РАН, 2010, 317 с.

English

Modern Environmental-Economic Situation and Public Health in the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia)*

Nataliia G. Stepanko

Pacific Geographic Institute, FEB RAS
7 Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia
sngreg25@mail.ru

Svetlana A. Lozovskaya

Pacific Geographic Institute, FEB RAS
7 Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia
lana.prima12@mail.ru

Vyacheslav G. Shvedov

Pacific Geographic Institute, FEB RAS
7 Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia
i-sv@yandex.ru

Abstract

The article is devoted to the consideration of the main parameters of environmental pollution in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia), AZRS, as well as to the analysis of their impact on the health status of the population of this region. The collected data indicate that the main source of pollutants in this case is the mining industry, additional sources are the energy sector, transport and reindeer husbandry. Their negative impact is enhanced by such natural features of the regional natural environment as the slow decomposition of pollutants due to the annual predominance of low temperatures and, due to the presence of permafrost, their concentration in the upper soil layers. As a result of the study of the state of health of the population of the AZRS, the main composition of regional pathologies was determined, and a territorial picture of the incidence of the population of the region was compiled. An assessment of the state of regional health care is given and some proposals are formulated to improve the efficiency of its work.

Keywords: AZRS, ecological and economic situation, environmental pollution, public health, healthcare system.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60103) and Federal Budget allocations (state target 116110810013-5).

Images & Tables

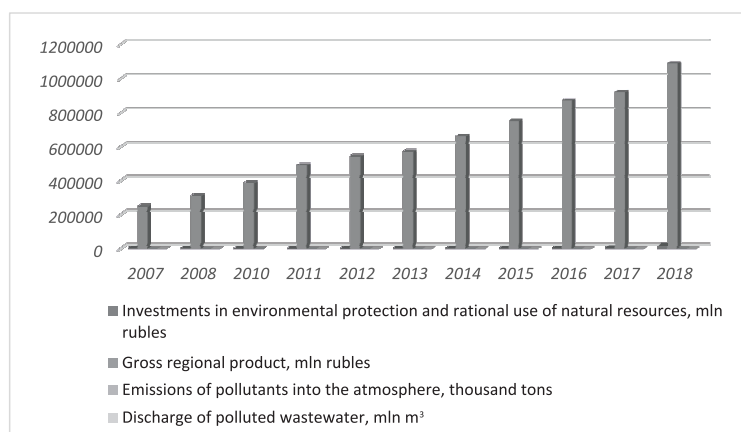


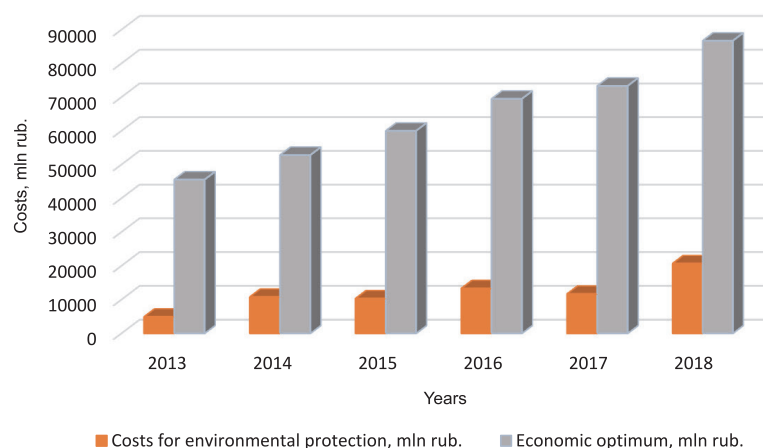
Fig. 1. The ratio of some environmental and economic indicators in Sakha (Yakutia).

Table 1. Differentiation of economic activity of the Arctic uluses of Sakha (Yakutia)

Uluses	Main types of economic activity	Possible types of promising economic activity	Hazard classes of industries (existing + possible)
Allaikhovsky	Reindeer herding; fur and fisheries; fish processing; food industry	Gold and mammoth tusk mining; musk ox reintroduction; reindeer herding; fur and fisheries; fish processing; food industry; production of leather and fur products	IV, V
Anabarsky	Mining and enrichment of diamonds; hunting; fishing; reindeer herding; souvenir production; air transportation (passenger and cargo); mammoth tusk mining	Mining of diamonds, coal and bitumen; musk ox reintroduction; reindeer breeding; fishing and hunting; food, leather and fur production; souvenir production	II, IV, V
Bulunsky	Reindeer herding; fishing and hunting; port facilities (sea trading port of Tiksi); airport	Mining of diamonds, coal and mammoth tusk; Tiksi port reconstruction; musk ox reintroduction; reindeer breeding; fishing and hunting; food, leather and fur production	III, V
Ust-Yansky	Tin and gold mining; fish processing; reindeer and fur farming; air transportation	Mining of gold, tin, coal and mammoth tusk; reindeer breeding; fishing and hunting; food, leather and fur production	II, IV, V
Nizhne-kolymsky	Reindeer herding; fur farming; fur hunting and fishing; fish processing; road construction; port facilities ("Zelenomyssk river port"); airport	Highway construction; thermal power plant; coal mining; Zelenomyssk river port reconstruction; reindeer herding; fishing and hunting; food, leather and fur production	III, IV, V

Table 2. Dynamics of the effectiveness of environmental activities in Sakha (Yakutia)

Year	Sum of ongoing costs + investment in fixed assets for environmental protection and rational use of natural resources, mln rub.	Economical optimum, mln rub. (8% in gross regional product) [11]	Gross regional product, mln rub.	Economic sufficiency index (ESI) of environmental protection (fact/optimum)
2013	4 889.7	45 530.5	569 131.6	0.10
2014	10 772.3	52 812.0	660 150.0	0.20
2015	10 314.8	59 999.0	749 987.5	0.20
2016	13 295.0	69 488.6	868 607.0	0.19
2017	11 667.2	73 321.5	916 518.6	0.16

**Fig. 2.** The ratio of actual and necessary costs for environmental protection.**Table 3.** Main investment projects in Sakha (Yakutia) (data from [12] were used)

Economic projects	Environmental projects
«Mineral raw materials industrial cluster MRIC «Ust-Yana»; «Field Tomtor development»; - development of hydrocarbon deposits on the shelf of the East Siberian Sea and the Laptev Sea; - creation of Chaun-Bilibin energy center; - reconstruction of infrastructure of «Seas port «Tiksi»; - reconstruction of LLC «Zelenomyssk river port» infrastructure; «Warmly of Arctic»; «Amphibious Assault»; «Arctic marble»; «Gifts of the Wild Arctic».	«Efficient waste management»; «Clean Arctic»; «Transparent environment»; «Protection of the animal life»; «Model territories KMNS»; «Comprehensive development of northern (domestic) reindeer breeding»; «Resources for the future of fisheries»; - efficient autonomous sources of thermal energy.

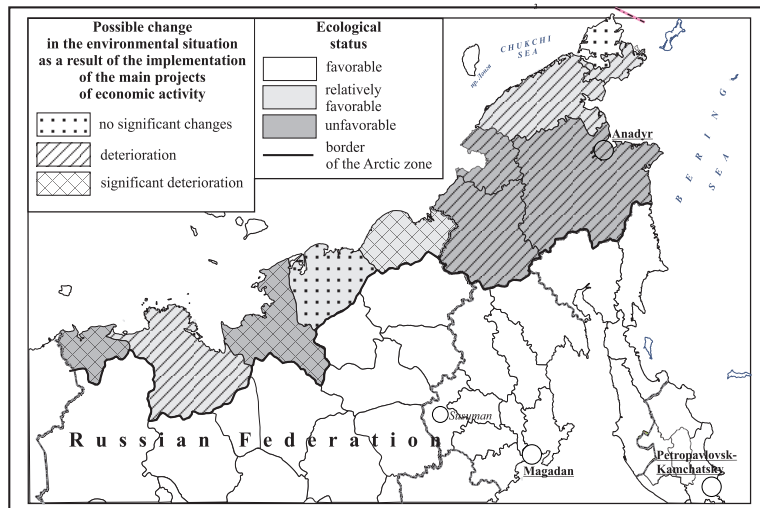


Fig. 3. The ecological status of the administrative subjects of North-East of Russia and the forecast of its possible change.

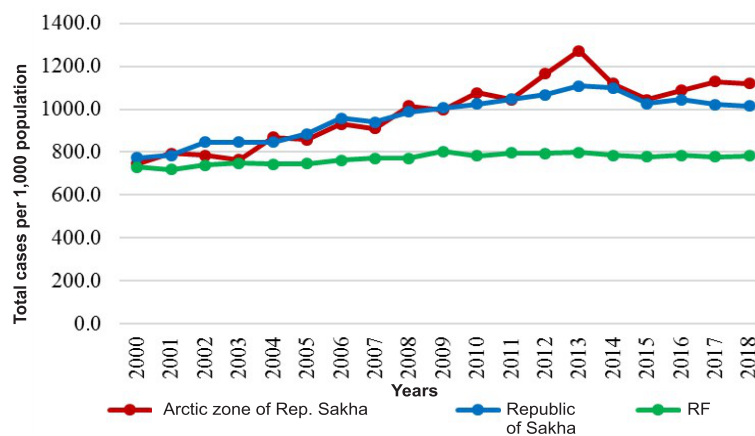


Fig. 4. Comparative dynamics of morbidity in the population of AZRS, the Republic of Sakha and the Russian Federation in 2000–2018, total cases per 1,000 population.

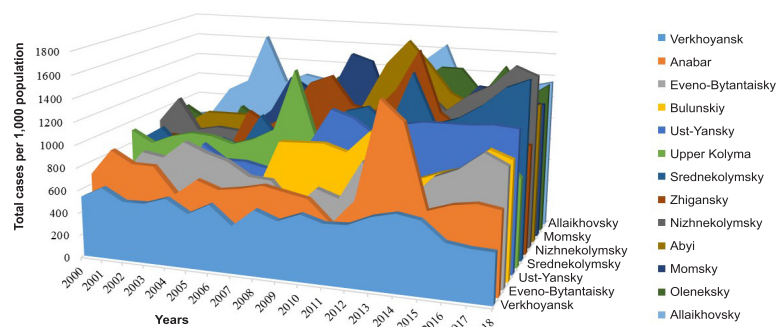


Fig. 5. Dynamics of the incidence of the population of AZRS in 2000–2018 with distribution according to the total incidence rates per 1,000 persons.

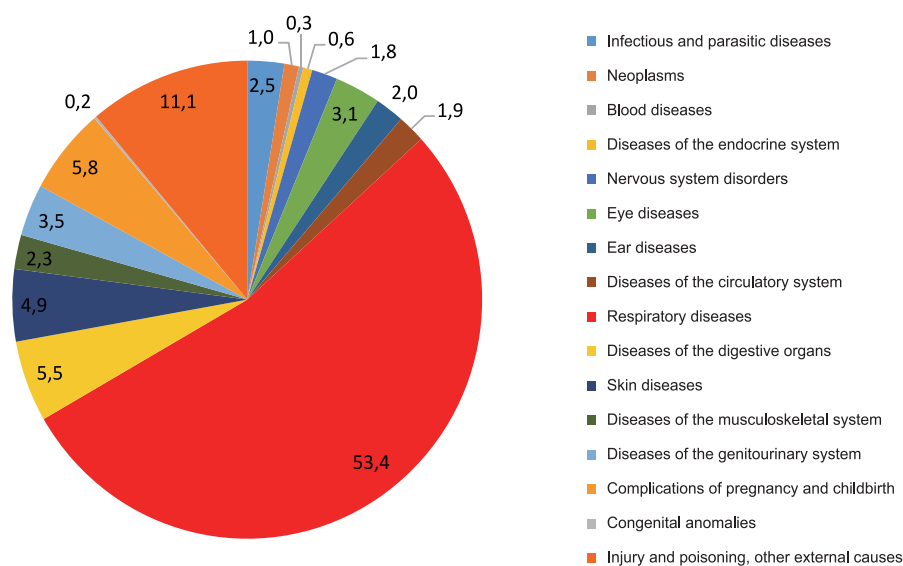


Fig. 6. The structure of primary morbidity of the entire population of the Republic of Sakha (Yakutia) by 2018, %.

References

1. State Report "On State and Protection of the Environment of the Republic Sakha (Yakutia) in 2017" [Gosudarstvenny doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2017 godu"], RF, Yakutsk, Ministry of Ecology of Republic Sakha (Yakutia), 2018, 571 pp. (in Russian).
2. State Report "On State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2016" [Gosudarstvenny doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2017 godu"], RF, Moscow, NIA-Nature Publ., 2017, 760 pp. (in Russian).
3. Main Indicators of Environmental Protection: Statistical Bulletin [Osnovnye pokazateli okhrany okruzhayushchey sredy: Statistichesky byulleten], RF, Moscow, Rosstat Publ., 2006, 93 pp. (in Russian).
4. Regions of Russia. Socio-Economic Indicators for 2016 [Regiony Ros-sii. Sotsialno-ekonomicheskie pokazateli za 2016 god], RF, Moscow, Rosstat Publ., 2016, 1326 pp. (in Russian).
5. Regions of Russia. Socio-Economic Indicators for 2019 [Regiony Ros-sii. Sotsialno-ekonomicheskie pokazateli za 2019 god], RF, Moscow, Rosstat Publ., 2019, 1204 pp. (in Russian).
6. Statistical Yearbook of the Republic of Sakha (Yakutia) [Statistichesky ezhegodnik Respubliki Sakha (Yakutiya)], RF, Yakutsk, Territorial department of the Federal State Statistics Service for the Republic of Sakha (Yakutia) Publ., 2017, 704 pp. (in Russian).
7. N.G. Stepanko Tomsk State Univ. J. [Vestnik Tom. gos. un-ta], 2013, №368, 173 (in Russian).
8. N.G. Stepanko In Natural Resource and Environmental Factors in the Development of Territorial Economic Structures: Collection of Articles [Prirodno-resursnye i ekologicheskie faktory v razvitiy territorialnykh khozyaystvennykh struktur: sbornik statey], Eds N.G. Stepanko, A.V. Moshkov, RF, Vladivostok, Dalnauka Publ., 2012, pp. 99–111 (in Russian).
9. N.S. Karamysheva, I.A. Vakhrushin, M.N. Perevala, Ju.V. Treskova Young Scientist [Moloday ucheny], 2015, №13(93), 845 (in Russian).
10. N.G. Stepanko Adv. Curr. Nat. Sci. [Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya], 2017, №4, 120 (in Russian).
11. S.I. Kolesnikov Economics of Environmental Management [Ekonomika prirodopolzovaniya], RF, Rostov-na-Donu, Rostov State University Publ., 2000, 40 pp. (in Russian).
12. Strategy for Socio-Economic Development of the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia) for the Period up to 2030 [Strategiya sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Arkticheskoy zony Respubliki Sakha (Yakutiya) na period do 2030 goda], RF, Yakutsk, Government of the Republic of Sakha (Yakutia) Publ., 2019, 107 pp. (in Russian).
13. A.B. Kosolapov Health of the Population of the Far East [Zdorove naseleniya Dal'nego Vostoka], RF, Vladivostok, Dalnauka Publ., 1996, 350 pp. (in Russian).
14. S.F. Lozovskaya, S.A. Stepanko, E.V. Izergina Fundam. Res. [Fundamentalnye issledovaniya], 2014, №5(part 6), 1334 (in Russian).
15. Yakutia Outlined the Main Problems of Access to Medical Care in the Northern Regions [Yakutiya oboznachila glavnye problemy dostupnosti medpomoshchi v severnykh rayonakh], IA Regnum, 27.05.2016 (in Russian). (<https://regnum.ru/news/2137582.html>).
16. N.M. Gogolev, T.E. Burtseva, S.L. Avrusin, L.N. Melnikova, T.V. Batilova, V.G. Chacnykh Pediatrician (St. Petersburg) [Pediatr], 2019, 10(4), 61 (in Russian). DOI: 10.17816/PED10461-66.
17. D.G. Tikhonov Arctic Medicine [Arkticheskaya meditsina], RF, Yakutsk, YNC SB RAS Publ., 2010, 317 pp. (in Russian).

Оценка воздействия опасных криогенных процессов на инженерные объекты в Арктике*

В.И. Гребенец, Ф.Д. Юров, А.И. Кизяков, Л.И. Зотова, А.А. Маслаков, В.А. Толманов,
И.Д. Стрелецкая

Выполнены комплексные исследования состояния инфраструктуры российской Арктики, проведена оценка степени деформированности объектов и влияния опасных криогенных процессов на устойчивость зданий и сооружений. Установлено, что в районах с вечной мерзлотой в урбанизированной среде развивается ряд опасных для инфраструктуры криогенных процессов, которые спровоцированы (или активизированы) техногенным воздействием или климатическими изменениями. Практически все здания и системы жизнеобеспечения на территории национальных поселков Заполярья находятся в аварийном или предаварийном состоянии, в промышленных центрах доля деформированности инженерной инфраструктуры варьирует от 20% до 80%, что часто вызвано развитием опасных криогенных процессов. Для оценки негативного воздействия наиболее деструктивных процессов на инфраструктуру населенных пунктов разработана методика, учитывающая степень пораженности территории, продолжительность, повторяемость процессов. Оценка риска проведена для полутора десятков поселений российской Арктики, при этом особое внимание уделено инфраструктуре севера Западной Сибири. Проанализировано воздействие на инфраструктуру Арктики размещения отходов, осуществлена их классификация по степени влияния на вечномерзлые основания. Даны предложения по стабилизации геотехнической обстановки в городах Арктики.

Ключевые слова: Арктика, вечномерзлые грунты, криогенные процессы, устойчивость, деформации инженерной инфраструктуры, риски и ущербы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60080).

Введение

В последние десятилетия отмечается нарастание рисков и ущербов, связанных с негативным воздействием опасных криогенных процессов на здания, сооружения и транспортные системы в криолитозоне.

Устойчивость инженерной инфраструктуры связана с литокриогенными условиями территории, климатическими изменениями (повышение температуры воздуха в Арктическом регионе и увеличение количества осадков) и различными техногенными воздействиями. Наличие в основаниях сооружений подземных льдов разного генезиса и льдистых дисперсных отложений, а также интенсив-

**ГРЕБЕНЕЦ****Валерий Иванович**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

**ЮРОВ****Федор Дмитриевич**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

**КИЗЯКОВ****Александр Иванович**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

**ЗОТОВА****Лариса Игоревна**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

**МАСЛАКОВ****Алексей Алексеевич**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

**ТОЛМАНОВ****Василий Андреевич**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

**СТРЕЛЕЦКАЯ****Ирина Дмитриевна**

Московский государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

ность природных криогенных процессов во многом определяют инженерно-геокриологическое состояние оснований объектов различного назначения. В свою очередь, тепловые, механические, силовые, динамические и физико-химические воздействия на вечную мерзлоту, сопровождающие техногенез и отличающиеся разнообразием, разномасштабностью, разнонаправленностью и, зачастую, асинхронностью, вызывают существенные изменения в природных геокриологических условиях, существовавших до застройки. Ситуация зависит также от региональных геолого-географических факторов и типа хозяйственного освоения территории: методов инженерной подготовки площадок, принятых способов строительства, назначения объектов, условий эксплуатации и т. п.

Ключевым звеном при обеспечении устойчивости инфраструктуры в Арктике является анализ и прогноз развития опасных для объектов криогенных процессов, а также разработка методов борьбы с ними и сохранения нормального функционирования зданий и сооружений, что и явилось целью настоящих исследований.

Материалы и методы исследований

В ходе исследований применялся широкий спектр материалов, полученных в результате обработки данных дистанционного зондирования, численного моделирования, статистического анализа и полевых наблюдений авторов.

Проявления опасных криогенных процессов, особенности их географического распространения и современной динамики развития устанавливались при помощи тематического дешифрирования временных космических и аэрофотоснимков.

Для сбора актуальных сведений о состоянии инженерных объектов в Арктическом регионе проведен анализ фондовых материалов (в том числе отчетные материалы органов технического надзора, геокриологических служб и других организаций), литературных источников, а также полевые исследования в крупнейших заполярных городах и населенных пунктах России. В ходе этих наблюдений проводилась фиксация интенсивности проявления криогенных процессов на хозяйственно освоенных территориях, особое внимание уделялось несущей способности вмороженных в мерзлоту фундаментов, изменению температуры грунтов, динамике сезонного оттаивания, развитию морозной деструкции материалов конструкций. Оценка состояния объектов инфраструктуры проводилась путем визуального осмотра с фиксацией провалов, трещин и

других деформаций. Для оценки деформированности зданий и сооружений в пунктах исследований применялся показатель степени деформированности – отношение количества зданий и сооружений, имеющих различного вида повреждения, к их общему числу.

Для ряда населенных пунктов рассчитана интегральная оценка риска от воздействия наиболее опасных криогенных процессов: термоэрозии и термоабразии, термокарста, склоновых процессов, морозного пучения, морозобойного растрескивания, наледеобразования. Степень риска оценивалась по известной методике [1], учитывающей площадь поражения территории тем или иным криогенным процессом, его повторяемость и продолжительность.

Населенные пункты разделялись на шесть групп по степени опасности процессов для инфраструктуры с присвоением балла:

- 1 балл – при низкой степени опасности,
- 2 балла – при средней,
- 3 балла – при повышенной,
- 4 балла – при высокой,
- 5 баллов – при чрезвычайно высокой,
- 6 баллов – при максимальной.

Сумма этих баллов для каждого населенного пункта позволяла получить обобщающий показатель – интегральную оценку риска от развития криогенных процессов.

Результаты и обсуждения

Связь литокриогенной основы с распространением и динамикой криогенных процессов

Реакция вечномерзлых пород и конкретные изменения арктических геосистем, связанные с современными климатическими трендами и техногенными воздействиями, определяются в значительной степени региональными условиями. Практически повсеместно в Арктике отмечается современное потепление

климата [2, 3]. Среди локальных условий, определяющих отклик геосистем на внешние воздействия, ведущую роль играет литокриогенное строение (которое определялось палеогеографическими условиями накопления и промерзания отложений), температура и характер распространения вечномерзлых пород и современная структура растительного покрова. Следствием повышения летних температур воздуха является растепление мерзлоты и рост глубины сезонного оттаивания, приводящие к оттаиванию крупных неглубоко залегающих подземных льдов (пластовых и полигонально-жильных) [4–6]. Эти факторы ожидаемо приводят к активизации ряда опасных криогенных процессов [7–13]. Активизация этих процессов также зачастую связана или усилена техногенными воздействиями на участках хозяйственного освоения Арктических равнин.

Исследования проводились по следующим основным направлениям:

- 1) изучение сложных взаимодействий в системе «гидросфера–атмосфера–литосфера» для береговых геосистем;
- 2) изучение проявлений криогенных процессов на внутренних равнинах Арктики;
- 3) исследование активизации этих деструктивных процессов в зависимости от эволюции природной обстановки [10, 11].

Собраны исходные данные и проанализировано распространение опасных криогенных процессов на севере Западной Сибири. Эти районы в плейстоцене испытывали неоднократные морские трансгрессии с накоплением морских и прибрежно-морских отложений, при промерзании которых сформировались крупные скопления подземного льда. Континентальный этап накопления осадков на Западном Ямале, начавшийся 35–48 тыс. лет назад (МИС-3), сопровождался формированием льдистых пород и ростом мощных сингене-

тических полигонально-жильных льдов. Крупные залежи реликтового льда определяют форму и темпы разрушения берегов в условиях современного потепления Арктики, что представляет угрозу для береговых сооружений, в том числе и трубопроводов, идущих через Байдарацкую губу [12]. Для выявления связи проявлений криогенных процессов с литокриогенной основой использованы материалы по льдистости верхних горизонтов вечномерзлой толщи Западной Сибири: 1) за счет льда-цемента и шлирового льда, 2) за счет полигонально-жильных и пластовых льдов [13]. На севере криолитозоны увеличение глубины сезонного оттаивания приводит к повсеместному термокарсту, активизации криогенных оползней, росту термоцирков. Возрастает интенсивность сезонного пучения грунтов. Следует отметить, что экзогенные геологические процессы в криолитозоне редко развиваются отдельно, а обычно образуют так называемые парагенетические ряды или комплексы. Ведущими среди криогенных процессов и представляющими наибольшую опасность являются термокарст, термоэрозия, криогенные склоновые процессы, рост термоцирков, пучение, морозобойное растрескивание, воронки газового выброса [14, 15].

Крупные залежеобразующие льды полигонально-жильные, ядра бугров пучения и пластовые залежи встречаются реже, чем текстурные льды, но значение их огромно, так их вытаивание ведет к активизации опасных криогенных процессов. Вытаивание полигонально-жильных льдов и пластовых залежей льда приводит к существенному изменению поверхности, активизации термоэрозионных процессов. В результате этого образуются крупные термокарстовые котловины, термоцирки, термоэрозионные овраги.

Рост годовых сумм положительных температур в условиях неглубоко залегающих подземных льдов приводит к активизации термоденудации. На Центральном Ямале в последние годы наблюдается интенсивный рост термоцирков, связанных с вытаиванием пластовых льдов [16]. Появляются новые термоцирки, а также после 2012 г. отмечен новый цикл активизации стабилизировавшихся прежде форм (рис. 1).

Термоцирки широко распространены не только во внутренних частях арктических равнин, но и на морских побережьях. Разрушение морских арктических берегов, сложенных вечномерзлыми породами, происходит в результате комплекса взаимодействующих процессов, преимущественно термоабразии и термоденудации. Существенная активизация этих процессов наблюдается на участках с выходами подземных льдов (пластовых или мощных полигонально-жильных) непосредственно в береговых уступах



Рис. 1. Термоцирк с вскрывающимся пластовым льдом на Центральном Ямале. На заднем плане виден мостовой переход через реку железной дороги «Обская – Бованенково» (Фотография Кизякова А.И., август 2018 г.).

или в ближайшей прибрежной полосе.

На западном побережье острова Колгуев (Баренцево море) темпы термоабразии в 2002–2012 гг. составляли 1.7–2.4 м/год, средняя скорость роста термоцирков (скорость термоденудации) в тот же период составляла 2.6 м/год. Максимальные скорости термоденудации до 15.1 м/год отмечены в 2009–2012 гг. [17, 18]. Авторами получены предварительные данные по скоростям роста термоцирков в бухте Мира на острове Новая Сибирь (архипелаг Новосибирские острова, Восточно-Сибирское море): максимальные скорости, достигавшие 15.5 м/год в 2007–2015 гг., сменились снижением в 2015–2018 гг. до 5.3–8.0 м/год [19]. Высокая скорость отступания стенок термоцирков с вскрывающимися полигонально-жильными и пластовыми льдами представляет реальную опасность для объектов инфраструктуры на арктических равнинах.

Одним из наиболее опасных процессов для конструкций на Крайнем Севере является морозобойное растрескивание. Составленная картосхема отражает возможность формирования в разных регионах морозобойных трещин; ранжирование основано на количестве «ударов холода», геолого-географическая основа которых обусловлена числом резких понижений температуры (более чем на 15 °C) в определенных условиях темпов снегонакопления и литокриогенного строения. Анализ метеорологических данных за период с 2000 по 2018 г. показал, что наиболее активно морозобойное растрескивание развивается в центральной Якутии, в Бурятии, Магаданской области и т. п. Характерно, что морозобойное растрескивание в ряде регионов Арктики при потеплении климата за последние 25–30 лет фактически не развивается в природных ландшафтах, однако, как показали наши полевые исследования в Норильске, Игарке, Новом Уренгое, этот процесс весьма активен на участках, регулярно очищаемых от снега (автодорогах, аэродромах и др.).

Получены оригинальные результаты при исследовании термоэрозии: установлена высокая роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния, а также выявлена существенная активизация разрушения берегов в конце теплого периода, когда наблюдается совпадение максимума осадков и наибольшей глубины сезонного оттаивания. Деструктивные криогенные процессы изменяют не только природные ландшафтные условия, но и являются одной из главных причин разрушения инфраструктуры в Арктике. Так, рост термоэрозионных оврагов на территории Ямбургского месторождения составляет в среднем 5 м/год, но может достигать 15–20 м в течение теплого периода [20, 21].

Относительно новым и уникальным криогенным явлением для континентальной криолитозоны севера Западной Сибири являются воронки газового выброса. Впервые с применением комплекса данных дистанционного зондирования и полевых наблюдений выполнен анализ известных воронок и их бугров-предшественников на Ямале и Гыданском полуострове с целью выявления сходства и различия в их характеристиках [22]. Сделан вывод, что механизм формирования воронок сходен для всех изученных объектов и контролируется внутренней геологической и криолитологической структурой четвертичных толщ Западной Сибири. Формирование воронок может быть достаточно быстрым процессом; предполагается, что активизация воронок газового выброса происходит на фоне повышения температур мерзлых пород в местах широкого распространения неглубоко залегающих пластовых льдов. Пластовые льды могут содержать метан *in situ*, который перераспределяется при повышении температуры льда и повышении давления газа, или служить ловушкой для скопления метана из мерзлых пород, залегающих ниже [14].

В результате анализа серии разновременных космических снимков по Сеяхинской воронке установлено, что формирование бугра-предшественника началось после 2012 г., а уже летом 2017 г. произошел взрыв этого бугра с образованием воронки. Бугры-предшественники известных воронок отличаются в размерах: относительная высота изменяется от 2 до 6 м, диаметр основания от 20 до 55 м. Диаметры образовавшихся воронок находятся в диапазоне от 25 до 37 м [22]. Воронки быстро заполняются водой, и в этих озерах в первое время фиксируется высокая концентрация метана [23].

Выполненные исследования показали активное развитие деструктивных криогенных процессов на севере Западной Сибири – регионе активного хозяйственного освоения. Основные угрозы связаны с воронками газовых выбросов, термоэрозией и термоабразией берегов, ростом термоцирков [11, 24].

Активизация процессов при хозяйственном освоении

При хозяйственном освоении территории происходит активизация антропогенно стимулированных криогенных процессов, которые можно разделить на следующие группы:

- 1) связанные с дополнительным отоплением вечномерзлых пород (термокарст, термоэрозия и термоабразия);
- 2) связанные с дополнительным охлаждением пород (морозобойное растрескивание, сезонное пучение и наледообразование);
- 3) группа склоновых процессов (солифлюкция, криогенные оползни течения и скольжения, опасные перемещения техногенно образовавшихся отвалов);
- 4) процессы, не имеющие полных аналогов в естественных условиях – отопление пород и снижение при этом несущей способности замороженных фундаментов; техногенное подтопление и засоление грунтов;
- 5) специфические процессы в сезонно-талом слое (морозная деструкция материалов подземных конструкций, неравномерное пучение и осадка грунтов в процессе промерзания – оттаивания).

Негативное воздействие на мерзлые грунты в пределах застроенных территорий во многом обусловлено изменением теплового баланса за счет изменения или уничтожения естественных покровов: растительного, почвенного и снежного.

Для оценки влияния перераспределения снега на состояние мерзлых пород в пределах городских территорий проведены натурные наблюдения в г. Норильске [25]. В ходе этих исследований выявлено, что около 600 отвалов на территории Норильска имеют толщину снега более 2.5 м. Такие отвалы занимают большие площади, что чрезвычайно негативно сказывается на зимнем охлаждении мерзлой толщи и, следовательно, снижает несущую способность замороженных свай. Таяние снегоотвалов в мае – июне приводит к подтоплению городских территорий (в том числе участков под зданиями, холодных проветриваемых подполий) и развитию неравномерных осадок и просадок грунтов.

Снегоотвалы в черте города превышают высоту естественного снежного покрова в 8–10 раз. Например, в 2019 г. к концу апреля мощность естественного снежного покрова составляла 70 см, а высота снегоотвалов на территории города достигала 3–5 м. Установлено, что при увеличении мощности снежного покрова изменение температуры мерзлых грунтов на глубине 10 м происходит практически экспоненциально. Проведенные расчеты показали, что при увеличении мощности снежного покрова с 0.7 до 1.5 м и моделировании с перспективой на 30 лет температура на уровне нулевых годовых амплитуд (на глубине 10 м) изменится на 2.5 °C в положительную сторону; при его увеличении до 2 м – на 2.75 °C [25].

Еще одним немаловажным фактором, оказывающим негативное влияние на мерзлые породы и приводящим к снижению устойчивости инженерных объектов в криолитозоне, является складирование отходов различных типов. Проблема складирования твердых отходов обостряется за счет хрупкости экосистем, водоупорных свойств мерзлых пород, развития деструктивных криогенных процессов, что осложняется современными трендами к потеплению климата. В целом, воздействие твердых отходов на окружающую среду в криолитозоне делится на следующие виды:

- механическое – накопление вещества и изменение рельефа, условий дренированности;
- физико-химическое, приводящее к загрязнению грунтов, поверхностных и подземных вод самими отходами и продуктами их распада;

- силовое – увеличения давления на грунтовые основания;
- тепловое, вызывающее отепление и разрушение вечномёрзлых грунтов, активизацию опасных криогенных процессов.

По результатам проведенных исследований [26] выделено восемь основных типов складирования отходов в криолитозоне, связанных с определенным характером их накопления (табл. 1).

Наиболее негативное воздействие оказывают шлако-, шламо- и хвостохранилища, вещество в которые поступает в виде горячих суспензий и расплавов, обладающих высокой химической агрессивностью. Крупные подобные объекты существуют в Норильске (рис. 2), Валькумее, Куларе, Лонгйире (Шпицберген) и других горнодобывающих районах.

Оценена степень деформированности объектов (рис. 3) в населенных пунктах российской Арктики. Наибольшая деформированность (почти 100%) характерна для малых национальных поселков и ряда городов Крайнего Севера, испытавших сильное

сокращение населения с 90-х годов прошлого века. Доля деформированных объектов в городах Арктики различна – в Воркуте порядка 80%, в Игарке почти 100% с учетом старой деревянной застройки, в Вилюйске 70%. Менее критичная ситуация наблюдается в Тикси (22%), Норильске (25%), Дудинке и Диксоне (35% без учета старой деревянной застройки). Анализ причин деформаций зданий и сооружений показал, что потепление климата или локальные природные изменения рельефа вызывают лишь 15–20% деформаций, а причиной подавляющего числа деформаций (до 85%) становятся опасные криогенные процессы, спровоцированные или активизированные за счет техногенного воздействия [27].

Таблица 1. Типы складирования отходов в криолитозоне

№	Тип складирования	Негативное воздействие на мерзлые породы и инфраструктуру
1.	Устройство на рельефе золоотвалов и шлако-, шламо- и хвостохранилищ	Разрушение мерзлоты при складировании горячих расплавов и суспензий, техногенное засоление, приводящее к изменению теплофизических свойств пород
2.	Складирование отвалов вскрышной породы при разработке месторождений открытым способом	Активизация склоновых процессов, формирование техногенных каменных глетчеров
3.	Полигоны складирования твердых бытовых отходов	Тепловыделение при разложении органики и образование таликовых зон, формирование непрогнозируемой инженерно-геологической среды на месте полигонов, выведенных из эксплуатации
4.	Складирование отходов лесопереработки	Тепловыделение при разложении опилок, коры и т. д., опасность возникновения пожаров
5.	Складирование бочек с остатками ГСМ	Загрязнение мерзлых грунтов ГСМ и изменение их теплофизических свойств, уничтожение растительного покрова
6.	Площадки хранения нефтепродуктов	Загрязнение мерзлых грунтов ГСМ и изменение их теплофизических и прочностных свойств, деформации резервуаров вплоть до их разрушения
7.	Площадки складирования снега, вывозимого с застроенных территорий при снегоуборке	Повышение температуры мерзлоты (вплоть до формирования несквозных таликов), активизация нивации, термоэрозии и солифлюкции на склонах
8.	Заброшенные жилые и промышленные здания, где происходит несанкционированное складирование мусора	Возможно как негативное (за счет сброса тепловыделяющих бытовых и химически агрессивных отходов), так и нейтральное влияние

Специфика регионов традиционного землепользования

Для районов традиционного землепользования арктических территорий выделяются специфические виды антропогенного воздействия. Так, для районов развития крупностадного оленеводства на территории НАО, ЯНАО и Таймырского (Долгано-Ненецкого) района Красноярского края отмечается нарастание дигрессии пастбищ за счет перевыпаса и активизация ряда криогенных процессов [28]. Наиболее остро эта проблема ощущается в ЯНАО, где общее поголовье оленей колеблется в пределах 750–800 тыс. голов. Площадь косвенного негативного влияния промышленных объектов в ЯНАО составляет около 3 млн га, при этом более половины приходится на зоны отчуждения магистральных и промысловых трубопроводов. Максимальная пастбищная нагрузка приходится на южную и центральную часть полуострова Ямал, особенно в местах постоянных прогонов крупных стад оленей по узким коридорам среди разветвленной сети промышленных объектов. Скорость восстановления выбитых и стравленных пастбищ изменяется от 8 до 50 лет в зависимости от типа напочвенного покрова.

Еще одним специфическим видом воздействия является создание в мерзлых породах подземных хранилищ – ледников, играющих важную роль в быте коренных малочисленных народов Севера. Проведены исследования крупнейшего ледника Лорино на Чукотском полуострове длиной 114 м и площадью 330 м² [29]. Анализ температурного режима ледника показал, что среднезимняя температура в его камерах колеблется в пределах -4.8...-6.2 °С, а летняя -3.5...-4.0 °С. Его стабильность обеспечивается за счет пассивной вентиляции холодным воздухом зимой (вклад которого в промораживание пород от года к году варьирует в пределах 8–44%) и увеличения термической



Рис. 2. Хвостохранилище «Лебяжье», Норильский промышленный район (фотография Гребенца В.И., август 2018 г.).



Рис. 3. Деформация дорожного покрытия в результате развития термокарста и вытаивания полигонально-жильных льдов под насыпью дороги (фотография Толманова В.А., сентябрь 2018 г.).

инертности в камерах и коридорах за счет хранения речного льда.

Оценка рисков от активизации криогенных процессов на освоенных территориях

Оценка рисков от воздействия опасных криогенных процессов была проведена для 37 муниципальных образований Арктического региона. Количественная оценка выполнялась для термоэрозии и термоабразии, термокарста, морозного пучения, морозобойного растрескивания, склоновых процессов и наледообразования. Эта оценка позволила выделить населенные пункты, для которых эти процессы представляют наибольшую опасность. Так, максимальная степень риска от активизации морозобойного растрескивания была получена для Хатанги; наледообразования – для Билибино и Хонуу;

морозного пучения – для Тарко-Сале; склоновых криогенных процессов – для Норильска, Билибино, Верхоянска, Депутатского и Хонуу; термоэрозии и термоабразии – Среднеколымска и Ямбурга.

Полученная в результате интегральная оценка степени опасности позволила распределить исследуемые населенные пункты по трем группам (табл. 2):

- 1) с максимальной вероятностью поражения освоенных территорий опасными криогенными процессами (Норильск, Хатанга и др.);
- 2) со средней степенью угрозы для инженерных объектов (Ямбург, Диксон и др.);
- 3) с относительно удовлетворительной ситуацией с точки зрения активизации опасных процессов (Новый Уренгой, Лабытнанги и др.).

Формирование природно-техногенных геокриологических комплексов

Для ряда населенных пунктов на основании полевых исследований, анализа литературных источников и обработки данных дистанционного зондирования Земли проведено выделение специфических природно-техногенных геокриологических комплексов (ПТГК) [30]. Например, для территории Норильска выделено 17 ПТГК, в большинстве из которых отмечаются тенденции к отеплению и деградации мерзлоты (исключение составляют лишь ВПП аэродрома и другие объекты, регулярно очищаемые от снега в зимний период, что приводит к дополнительному охлаждению мерзлых пород); в пределах некоторых из этих комплексов (карьеры открытой добычи, шлако- и шламохранилища, территории заводов цветной металлургии) мерзлота полностью исчезла. Такая пестрая картина обусловлена как исходной мозаичностью ландшафтно-мерзлотных условий, так и большими различиями в виде техногенного воздействия. Для территории Игарки выделено 11 основных ПТГК, для Ямбургского ГКМ – 7 комплексов.

Управление мерзлотной обстановкой

Одной из важнейших задач при хозяйственном освоении регионов Крайнего Севера является необходимость обеспечения надежности инженерной инфраструктуры, прежде всего, с учетом ухудшающихся геокриологических условий при климатических изменениях.

Основными направлениями управления мерзлотной обстановкой для обеспечения устойчивости зданий и сооружений являются:

- укрепление мерзлоты, повышение ее несущей способности, сокращение деятельного слоя (зоны воздействия касательных сил морозного пучения на сваи);

- протаивание в южной криолитозоне линз или маломощных высокотемпературных слоев мерзлоты;
- сохранение “*status quo*” для вечномерзлых оснований существующих объектов.

Могут применяться как «пассивные» (направлены на изменение условий внешнего теплообмена в системе «атмосфера–поверхность–грунт»), так и «активные» методы (воздействие на грунты по их глубине). Для Арктической зоны России наиболее актуальны методы, направленные на укрепление мерзлоты.

К «пассивным» методам можно отнести:

- оптимизацию застройки, ее уплотнение за счет возведения зданий с эффективно действующими холодными проветриваемыми подпольями;
- водоотведение;
- обустройство мест складирования отходов;
- снегоочистку территорий;
- теплоизоляцию в теплое время года локальных участков.

Наши наблюдения показали, что сочетание снегоуборки и летней теплоизоляции поверхности может обеспечить понижение температуры мерзлоты на 2–3 °С, а также сокращение глубины СТС на 30–50%.

«Активный» метод, тепловое воздействие на грунты может осуществляться за счет подачи охлаждающей среды (хладагента) в глубинные охлаждающие колонки. Наиболее интенсивно совершенствуются и широко применяются автономно действующие сезонноохлаждающие устройства, использующие неограниченные на Севере запасы природного холода для его «перекачки» в грунты. В последние 20–30 лет в Арктике предпочтение отдается парожидкостным устройствам.

Заключение

Проведены комплексные исследования негативного воздействия

Таблица 2. Группировка населенных пунктов по степени опасности воздействия опасных криогенных процессов

Степень риска	Муниципальное образование	Значение интегральной оценки опасности (в баллах)
Относительно удовлетворительная	Тарко-Сале*	11
	Анадырь	12
	Новый Уренгой	14
	Лабытнанги	15
	Надым	17
	Харп*	17
Средняя	Белая гора*	18
	Елецкий*	18
	Тикси	18
	Зырянкa*	19
	Тазовский*	19
	Дудинка	20
	Игарка	20
	Лорино*	20
	Новый Порт*	20
	Салехард	20
	Верхоянск*	21
	Кюсюр*	21
	Мыс Шмидта*	21
	Чокурдах*	21
	Ямбург	21
	Амдерма*	22
	Оленёк*	22
	Певек*	22
	Воркута	23
	Диксон*	23
	Жиганск*	23
	Казачье*	23
	Хонуу*	23
	Черский *	23
Высокая	Билибино	24
	Волочанка*	24
	Депутатский*	24
	Нижнеянск*	24
	Хатанга*	25
	Среднеколымск*	28
	Норильск	28

*Оценка проводилась для территории в радиусе 8–10 км от населенного пункта.

криогенных процессов на инженерную инфраструктуру Арктического региона России. Установлено, что на хозяйственно освоенных территории-

ях в криолитозоне за счет техногенного воздействия (удаления естественных покровов, отепления грунтов и т. д.) происходит активизация опасных для инфраструктуры криогенных процессов.

Рассчитан интегральный показатель степени риска от активизации процессов (термокарст, термоэрозия и термоабразия, криогенные оползни и движение каменных глетчеров, морозное пучение, морозобойное растрескивание, наледеобразование) для 37 городов и поселений российской Арктики. Выявлено, что в контексте климатических изменений и при нарастании техногенной нагрузки особую опасность для инженерных объектов представляют процессы, активизация которых связана с дополнительным отоплением поверхности. Натурные наблюдения показали, что в западной части Арктики наблюдается новый цикл активизации термоцирков, связанных с вытаиванием пластовых льдов. Установлена высокая роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния для термоэрозионных оврагов.

Проанализированы воздействия на мерзлые породы и инженерные объекты складирования бытовых и промышленных отходов. На основе полевых наблюдений в населенных пунктах криолитозоны выделено восемь типов накопления отходов, а также выявлены четыре вида их воздействия.

Осуществлена оценка негативного влияния перераспределения снега при снегоуборке на застро-

енных территориях за счет формирования мощных отвалов, которые отепляют мерзлоту, активизируют опасные криогенные процессы и вызывают деформации зданий и сооружений.

Установлено, что при хозяйственном освоении территории в криолитозоне происходит трансформация естественных условий и формирование специфических природно-техногенных геоэкологических комплексов, свойства которых определяются типом антропогенного воздействия и исходными условиями природной среды. В пределах этих комплексов прослеживается особое сочетание криогенных процессов и фиксируется различная устойчивость инфраструктуры даже для однотипных объектов.

Охарактеризованы основные методы управления мерзлотной обстановкой для обеспечения устойчивости инфраструктуры в Арктике.

Литература

1. Д.Н. Айбулатов, Т.Г. Глазовская, В.И. Гребенец, А.А. Деркачева, С.А. Сократов, В.А. Толманов, А.С. Турчанинова, Т.И. Хисматуллин, Д.И. Школьный, А.Л. Шнытарков
Развитие транспортных сетей Сибири и Дальнего Востока с учетом опасных природных процессов и явлений, РФ, Москва, Перо, 2021, 200 с.
2. J. Cohen, J. Screen, J. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones
Nat. Geosci., 2014, 7, 627. DOI: 10.1038/ngeo2234.
3. E.A. Barnes, L.M. Polvani
J. Climate, 2015, 28(13), 5254. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00589.1.
4. V. Romanovsky, K. Isaksen, D. Drozdov, O. Anisimov, A. Instanes, M. Leibman, A.D. McGuire, N. Shiklomanov, S. Smith, D. Walker
В AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), DK, Odder, Gylling, Narayana Press, 2017, pp. 65–102. (<https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>).
5. B.K. Biskaborn, S.L. Smith, J. Noetzli, H. Matthes, etc.
Nat. Commun., 2019, 10(1), 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
6. А.А. Васильев, А.Г. Гравис, А.А. Губарьков, Д.С. Дроздов, Ю.В. Коростелев, г.В. Малкова, г.Е. Облогов, О.Е. Пономарева, М.Р. Садуртдинов, И.Д. Стрелецкая, Д.А. Стрелецкий, Е.В. Устинова, Р.С. Широков
Криосфера Земли, 2020, 24(2), 15. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
7. М.Н. Григорьев, В.В. Куницкий, Р.В. Чжан, В.В. Шепелев
География и природные ресурсы, 2009, №2, 5.
8. F. Günther, P.P. Overduin, A.V. Sandakov, G. Grosse, M.N. Grigoriev
Biogeosciences, 2013, 10(6), 4297. DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
9. I. Nitze, S.W. Cooley, C.R. Duguay, B.M. Jones, G. Grosse
The Cryosphere, 2020, 14(12), 4279. DOI: 10.5194/tc-14-4279-2020.
10. В.И. Гребенец, И.Д. Стрелецкая, А.И. Кизяков
В Сб. Тез. докл. Всерос. науч. конф. «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях» (РФ, Сочи, 25–28 сентября 2019), РФ, Москва, ИГ РАН, 2019, с. 39–41.
11. А.И. Кизяков, И.Д. Стрелецкая, В.И. Гребенец
В Proc. American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting (USA, CA, San Francisco, 9–13 December, 2019), USA, CA, San Francisco, AGU, 2019, C41D–1490. (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/489856>).
12. И. Стрелецкая, А. Кизяков, А. Васильев, Г. Облогов, Д. Некрасов
В Сб. Тез. докл. Междунар. конф. «Криосферные ребусы» (РФ, Пушино, 15–18 апреля, 2019), РФ, Пушино, ИФХиБПП РАН, 2019, с. 141–142.
13. Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000, под ред. В.Т. Трофимова, СССР, Воронеж, ПГО «Центргеология», 1982.
14. И.Д. Стрелецкая, М.О. Лейбман, А.И. Кизяков, г.Е. Облогов, А.А. Васильев, А.В. Хомутов, Ю.А. Дворников
Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2017, №2, 91.
15. А.И. Кизяков, И.Д. Стрелецкая, В.И. Гребенец, Ю.Б. Баду
В Мат. докл. XIV Общероссийской науч.-практ. конф.

- «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (РФ, Москва, 11–14 декабря, 2018), РФ, Москва, Геомаркетинг, 2018, с. 268–272.
16. **A. Khomutov, M. Leibman, Y. Dvornikov, A. Gubarkov, D. Mullanurov, R. Khairullin**
В Proc. 4th WLF 2017 "Advancing Culture of Living with Landslides", Eds M. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa, DE, Cham, Springer Int. Publ., 2017, pp. 209–216.
DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_24.
 17. **А.И. Кизяков, F. Günther, М.В. Зимин, А.В. Сониюшкин, Е.Ю. Жданова**
В Мат. докл. XV Общерос. науч.-практ. конф. «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (РФ, Москва, 26–29 ноября, 2019), РФ, Москва, Геомаркетинг, 2019, с. 274–279.
 18. **F. Günther, A.I. Kizyakov, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin**
В Мат. Междунар. конф. «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов (Опасные явления)» (РФ, Ростов-на-Дону, 13–23 июня, 2019), РФ, Ростов-на-Дону, Изд. ЮНЦ РАН, 2019, с. 221–222 (англ. яз.).
 19. **A.I. Kizyakov, F. Günther, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin, S. Wetterich**
В Proc. 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium – Book of Abstracts (Germany, Potsdam, 10–14 September, 2018), Eds F. Günther, G. Grosse, B.M. Jones, Germany, Potsdam, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein.
(https://epic.awi.de/id/eprint/48600/1/Coastal_destruction_in_the_western_and_eastern-most_occurrence_of_tabular_ground_ice_in_the_Eurasian_Arctic.pdf).
 20. **V.A. Tolmanov, V.I. Grebenets**
В Proc. AGU 100 Advanced Earth and Space Science Fall Meetings (USA, Washington, DC, 10–14 December, 2018), GC33E-1407. Publ. 12 Dec 2018.
(<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/377931>).
 21. **В.А. Толманов, В.И. Гребенец**
В Сб. Тезисы докл. Всерос. конф. «Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий» (РФ, Сочи, 24–29 сентября, 2018), РФ, Москва, ИГ РАН, Гляциологическая ассоциация, 2018, с. 24.
 22. **A. Kizyakov, M. Leibman, M. Zimin, A. Sonyushkin, Y. Dvornikov, A. Khomutov, D. Dhont, E. Cauquil, V. Pushkarev, Y. Stanilovskaya**
Remote Sensing, 2020, 12(14), 2182.
DOI: 10.3390/rs12142182.
 23. **Y.A. Dvornikov, M.O. Leibman, A.V. Khomutov, A.I. Kizyakov, P.B. Semenov, I. Bussmann, E.M. Babkin, B. Heim, A. Portnov, E.A. Babkina, I.D. Streletskaia, A.A. Chetverova, A. Kozachek, H. Meyer**
Permafrost Periglac. Process., 2019, 30(3), 146.
DOI: 10.1002/ppp.2014.
 24. **В.И. Гребенец, И.Д. Стрелецкая, А.И. Кизяков**
В Сб. Тезисы докл. Всерос. науч. конф. «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях» (РФ, Сочи, 25–28 сентября, 2019), РФ, Москва, ИГ РАН, 2019, с. 39.
 25. **В.И. Гребенец, В.А. Толманов**
Лед и снег, 2021, 61(3), 457.
DOI: 10.31857/S2076673421030101.
 26. **V. Grebenets, V. Tolmanov, F. Iurov, P. Groisman**
Environ. Res. Lett., 2021, 16(10), 105007.
DOI: 10.1088/1748-9326/ac2375.
 27. **В.И. Гребенец, А.И. Кизяков, А.А. Маслаков, С.А. Сократов, И.Д. Стрелецкая, В.А. Толманов, Ф.Д. Юров**
Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2022, №2, 25.
 28. **N. Tumel, L. Zotova**
Geosciences, 2019, 9(8), 353.
DOI: 10.3390/geosciences9080353.
 29. **A.A. Maslakov, K.E. Nyland, N.N. Komova, F.D. Yurov, K. Yoshikawa, G.N. Kraev**
Geogr. Env. Sustain., 2020, 13(3), 49.
DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
 30. **В.И. Гребенец, А.А. Найдено, В.А. Толманов, А.Г. Хайрединова, В.Б. Павлушин**
В Сб. науч. трудов «Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых», Вып. 19 (по мат. годичной сессии ИС РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, РФ, Москва, 4–5 апреля, 2017), РФ, Москва, РУДН, 2017, с. 448–453.

English

Assessment of Hazardous Cryogenic Processes Impact on Engineering Facilities in the Arctic*

Valery I. Grebenets

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
vgreb@inbox.ru

Fedor D. Iurov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
fdiurov@gmail.com

Alexander I. Kizyakov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
akizyakov@mail.ru

Larisa I. Zotova

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
zotlar@geogr.msu.ru

Alexey A. Maslakov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Vasily A. Tolmanov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
vasiliytolmanov@gmail.com

Irina D. Streletskaia

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
irinastrelets@gmail.com

Abstract

Comprehensive studies of the state of the infrastructure in the Russian Arctic were carried out. The degree of deformation of objects and the impact of dangerous cryogenic and nival-glacial processes on the stability of buildings and constructions were assessed. It was established that a number of cryogenic processes that are dangerous for the infrastructure were developing in urbanized areas of the permafrost zone. They are caused (or activated) by anthropogenic impact or by climatic changes. Thermokarst, thermal erosion and thermal abrasion of banks, icings formation are activating. The tangential forces of frost heaving increase due to the increase of the active layer depth. Almost all the buildings and the life support systems at the territories of the national settlements of the Polar region are in an emergency or pre-emergency state. The percentage of deformation of the engineering infrastructure varies from 20% to 80% in industrial centers, which is often caused by the development of dangerous cryogenic processes. A methodic was developed to assess the negative impact of the most destructive processes on the infrastructure of settlements. It takes into account the degree of damage to the territory, the duration, and repeatability of processes. The risk assessment was carried out for one and a half dozen settlements in the Russian Arctic, with special attention paid to the infrastructure of the north of Western Siberia. The impact of waste disposal on the infrastructure of the Arctic was analyzed. A classification was proposed based on the degree of their influence on permafrost foundations. Proposals on stabilization of geotechnical situation in Arctic cities are given.

Keywords: Arctic, permafrost, cryogenic processes, sustainability, deformation of engineering infrastructure, risks and damages.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60080).116110810013-5).*

Images & Tables

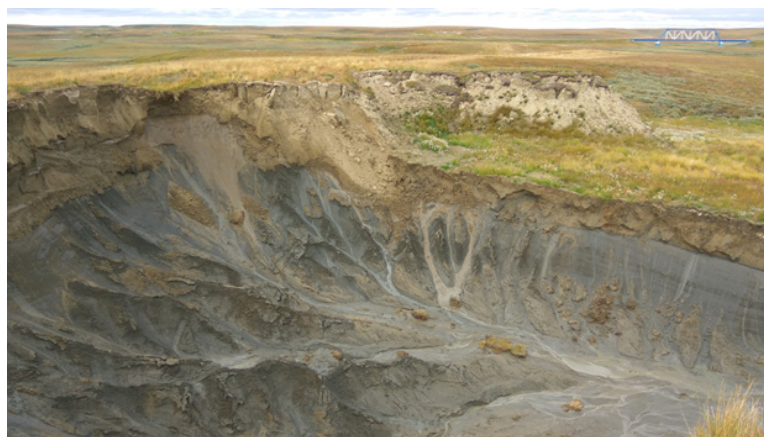


Fig. 1. Thermocirque with tabular ground ice exposure in Central Yamal. On the background one can see the Obskaya – Bovanenkovo railway bridge crossing over a river (Photo by Kizyakov A.I., August 2018).



Fig. 2. Tailing dump «Lebyazhe», Norilsk industrial region (photo by Grebenets V.I., August 2018).

Table 1. *Types of storage of waste on permafrost*

№	Type of storage	Negative impact on frozen ground and infrastructure
1.	Installation of ash dumps and slag-sludge-tailing dumps on the relief	Destruction of permafrost during the storage of hot melts and suspensions, technogenic salinization, leading to a change in the thermal properties of rocks
2.	Storage of overburden dumps during open pit mining	Activation of slope processes, formation of technogenic stone glaciers
3.	Landfills for the trash storage	Heat release during the decomposition of organic matter and the formation of talik (thaw) zones, formation of an unpredictable engineering and geological environment at the site of landfills decommissioned
4.	Storage of timber waste	Heat generation from the decomposition of sawdust, bark, etc., fire hazard
5.	Storage of barrels with fuel residues	Pollution of frozen soils with fuels and lubricants and changes in their thermal and physical properties, destruction of vegetation cover
6.	Oil storage sites	Pollution of frozen soils with fuels and lubricants, changes in their thermal, and physical properties, bearing capacity, deformation of storage tanks up to their destruction
7.	Storage areas for snow removed from built-up areas during snow removal	An increase in permafrost temperature (up to the formation of taliks), activation of nivation, thermal erosion and solifluction on slopes
8.	Abandoned residential and industrial buildings where unauthorized waste storage occurs	Both negative (due to the discharge of hot and cold water and chemically aggressive waste) and neutral impact are possible

**Fig. 3.** *Deformation of the road surface as a result of the development of thermokarst and the melting of polygonal ice under the road embankment (photo by Tolmanov V.A., September 2018).*

Table 2. Grouping of settlements according to the degree of danger from the impact of hazardous cryogenic processes

Degree of risk	Settlement	The value of the integral hazard assessment (in points)
Relatively satisfactory	Tarko-Sale*	11
	Anadyr	12
	New Urengoy	14
	Labytnangi	15
	Nadym	17
	Harp*	17
Average	Belaya Gora*	18
	Yeletsky*	18
	Tiksi	18
	Zyryanka*	19
	Tazovsky*	19
	Dudinka	20
	Igarka	20
	Lorino*	20
	Noviy Port*	20
	Salekhard	20
	Verkhoyansk*	21
	Kyusyur*	21
	Cape Schmidt*	21
	Chokurdah*	21
	Yamburg	21
	Amderma*	22
	Olenyok*	22
	Pevek*	22
	Vorkuta	23
	Dixon*	23
	Zhigansk*	23
	Kazachye*	23
	Honuu*	23
	Chersky*	23
High	Bilibino	24
	Volochanka*	24
	Deputatskiy*	24
	Nizhneyansk*	24
	Khatanga*	25
	Srednekolymsk*	28
	Norilsk	28

*The assessment was carried out for the area within a radius of 8–10 km around the settlement.

References

1. D.N. Aybulatov, T.G. Glazovskaya, V.I. Grebenets, A.A. Derkacheva, S.A. Sokratov, V.A. Tolmanov, A.S. Turchaninova, T.I. Khismatullin, D.I. Shkolnyj, A.L. Shnyparkov
Development of Transport Networks of Siberia and the Far East Taking into Account Dangerous Natural Processes and Phenomena [Razvitie transportnykh setey Sibiri i Dalnego Vostoka s uchetom opasnykh prirodnykh protsessov i yavleniy], RF, Moscow, Pero Publ. House, 2021, 200 pp. (in Russian).
2. J. Cohen, J. Screen, J. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones
Nat. Geosci., 2014, 7, 627.
DOI: 10.1038/ngeo2234.
3. E.A. Barnes, L.M. Polvani
J. Climate, 2015, 28(13), 5254.
DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00589.1.
4. V. Romanovsky, K. Isaksen, D. Drozdov, O. Anisimov, A. Instanes, M. Leibman, A.D. McGuire, N. Shiklomanov, S. Smith, D. Walker
In AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), DK, Odder, Gylling, Narayana Press, 2017, pp. 65–102. (<https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>).
5. B.K. Biskaborn, S.L. Smith, J. Noetzli, H. Matthes, etc.
Nat. Commun., 2019, 10(1), 264.
DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
6. A.A. Vasilev, A.G. Gravis, A.A. Gubarkov, D.S. Drozdov, Yu.V. Korostev, G.V. Malkova, G.E. Oblogov, O.E. Ponomareva, M.R. Sadurtdinov, I.D. Streletskaya, D.A. Streletskij, E.V. Ustinova, R.S. Shirokov
Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2020, 24(2), 15 (in Russian).
DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
7. M.N. Grigorev, V.V. Kunitskij, R.V. Chzhan, V.V. Shepelev
Geogr. Nat. Resour., 2009, 30(2), 101.
DOI: 10.1016/j.gnr.2009.06.002.
8. F. Günther, P.P. Overduin, A.V. Sandakov, G. Grosse, M.N. Grigoriev
Biogeosciences, 2013, 10(6), 4297.
DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
9. I. Nitze, S.W. Cooley, C.R. Duguay, B.M. Jones, G. Grosse
The Cryosphere, 2020, 14(12), 4279.
DOI: 10.5194/tc-14-4279-2020.
10. V.I. Grebenets, I.D. Streletskaya, A.I. Kizyakov
In Proc. All-Russian Sci. Conf. "Interaction of Elements of the Natural Environment in High-Latitude Conditions" [Vseros. nauch. konf. «Vzaimodeystvie elementov prirodnoy sredy v vysokoshirotnykh usloviyakh»] (RF, Sochi, 25–28 September, 2019), RF, Moscow, IG RAN, 2019, pp. 39–41 (in Russian).
11. A.I. Kizyakov, I.D. Streletskaya, V.I. Grebenets
In Proc. American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting (USA, CA, San Francisco, 9–13 December, 2019), USA, CA, San Francisco, AGU, 2019, C41D-1490. (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/489856>).
12. I. Streletskaya, A. Kizyakov, A. Vasiliev, G. Oblogov, D. Nekrasov
In Proc. Internat. Conf. "Solving the Puzzles from Cryosphere": Program, (RF, Pushchino, 15–18 April, 2019), RF, Pushchino, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS, 2019, pp. 141–142 (in Russian).
13. Map of Genetic Types and Iciness of the Upper 10-meter Section of Permafrost Rocks of the West Siberian Plate. Scale 1:1,000,000 [Karta geneticheskikh tipov i distosti verkhney 10-metrovoy chasti razreza mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoy plity. Masshtab 1:1 000 000], Ed. V.T. Trofimov, USSR, Voronezh, PGO "Tsentrgeologiya", 1982 (in Russian).
14. I.D. Streletskaya, M.O. Lejbman, A.I. Kizyakov, G.E. Oblogov, A.A. Vasilev, A.V. Khomutov, Yu.A. Dvornikov
Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin, Ser. 5, Geography], 2017, №2, 91 (in Russian).
15. A.I. Kizyakov, I.D. Streletskaya, V.I. Grebenets, Yu.B. Badu
In Proc. XIV All-Russian Sci. Pract. Conf. "Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation" [Mat. dokl. XIV Obshcheros. nauch.-prakt. konf. "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskany v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii"] (RF, Moscow, 11–14 December, 2018), RF, Moscow, "Geomarketing" Publ. House, 2018, pp. 268–272 (in Russian).
16. A. Khomutov, M. Leibman, Y. Dvornikov, A. Gubarkov, D. Mullanurov, R. Khairullin
In Proc. 4th WLF 2017 "Advancing Culture of Living with Landslides", Eds M. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa, DE, Cham, Springer Int. Publ., 2017, pp. 209–216.
DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_24.
17. A.I. Kizyakov, F. Günther, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin, E.Yu. Zhdanova
In Proc. XV All-Russian Sci. Pract. Conf. "Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation" [Mat. dokl. XV Obshcheros. nauch.-prakt. konf. "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskany v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii"] (RF, Moscow, 26–29 November, 2019), RF, Moscow, "Geomarketing" Publ. House, 2019, pp. 274–279 (in Russian).
18. F. Günther, A.I. Kizyakov, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin
In Proc. Int. Conf. "Patterns of Formation and Impact of Marine, Atmospheric Hazards and Catastrophes on the Coastal Zone of the Russian Federation in the Context of Global Climatic and Industrial Challenges (Hazardous Phenomena)" [Zakonomernosti formirovaniya i vozdejstvia morskikh, atmosferykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh globalnykh klimaticheskikh i industrialnykh vyzovov (Opasnye yavleniya): Mat. Mezhdunar. konf.], (RF, Rostov-na-Donu, 13–23 June, 2019), RF, Rostov-na-Donu, RAS Southern Scientific Center Publ., pp. 221–222.
19. A.I. Kizyakov, F. Günther, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin, S. Wetterich
In Proc. 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium – Book of Abstracts (Germany, Potsdam, 10–14 September, 2018), Eds F. Günther, G. Grosse, B.M. Jones, Germany, Potsdam, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. (https://epic.awi.de/id/eprint/48600/1/Coastal_destruction_in_the_western_and_eastern-most_occurrence_of_tabular_ground_ice_in_the_Eurasian_Arctic.pdf).
20. V.A. Tolmanov, V.I. Grebenets
In Proc. AGU 100 Advanced Earth and Space Science 2018 Fall Meetings (USA, Washington, DC, 10–14 December, 2018), GC33E-1407. Publ. 12 Dec 2018. (<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/377931>).
21. V.A. Tolmanov, V.I. Grebenets
In Proc. All-Russian Conf. "Interdisciplinary Scientific Research for the Development of Mountainous and Arctic Territories" [Tezisy dokl. vseros. konf. "Mezhdistsiplinarnye nauchnye issledovaniya v tselyakh osvoenia gornykh i arkticheskikh territoriy"] (RF, Sochi, 24–29 September, 2018), RF, Moscow, Publ. IG RAS & Glaciological Association, 2018, p. 24 (in Russian).
22. A. Kizyakov, M. Leibman, M. Zimin, A. Sonyushkin, Y. Dvornikov, A. Khomutov, D. Dhont, E. Cauquil, V. Pushkarev, Y. Stanilovskaya
Remote Sensing, 2020, 12(14), 2182. DOI: 10.3390/rs12142182.
23. Y.A. Dvornikov, M.O. Leibman, A.V. Khomutov, A.I. Kizyakov, P.B. Semenov, I. Bussmann, E.M. Babkin, B. Heim, A. Portnov, E.A. Babkina, I.D. Streletskaya, A.A. Chetverova, A. Kozachek, H. Meyer
Permafrost and Periglacial Processes, 2019, 30(3), 146.
DOI: 10.1002/ppp.2014.
24. V.I. Grebenets, I.D. Streletskaya, A.I. Kizyakov
In Proc. All-Russian Sci. Conf. "Interaction of Elements of the Natural Environment in High-Latitude Conditions" [Tezisy dokl. Vseros. nauch. konf. «Vzaimodeystvie elementov prirodnoy sredy v vysokoshirotnykh usloviyakh»] (RF, Sochi, 25–28 September 2019), RF, Moscow, Publ. IG RAS, 2019, p. 39 (in Russian).
25. V.I. Grebenets, V.A. Tolmanov
Ice and Snow J. [Led i sneg], 2021, 61(3), 457 (in Russian).
DOI: 10.31857/S2076673421030101.

26. V. Grebenets, V. Tolmanov, F. Iurov, P. Groisman
Environ. Res. Lett., 2021, **16**(10), 105007.
DOI: 10.1088/1748-9326/ac2375.
27. V.I. Grebenets, A.I. Kizyakov, A.A. Maslakov, S.A. Sokratov, I.D. Streletskaya, V.A. Tolmanov, F.D. Yurov
Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya [Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography], 2022, №2, 25 (in Russian).
28. N. Tumel, L. Zotova
Geosciences, 2019, **9**(8), 353. DOI: 10.3390/geosciences9080353.
29. A.A. Maslakov, K.E. Nyland, N.N. Komova, F.D. Yurov, K. Yoshikawa, G.N. Kraev
Geogr. Env. Sustain., 2020, **13**(3), 49.
DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
30. V.I. Grebenets, A.A. Najdenko, V.A. Tolmanov, A.G. Khajredinova, V.B. Pavlunin
In Proc. "Sergeev Readings. Geoecological Safety of the Development of Mineral Deposits", Iss. 19 (based on the mater. of the Annual Session of the RAS Scientific Council on the Problems of Geoecology, Engineering geology and Hydrogeology) [«Sergeevskie chtenia. Geoekologicheskaya bezopasnost razrabotki mestorozhdeny poleznykh iskopaemykh», Vyp. 19 (po mat. godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii, RF, Moscow, 4-5 Apr., 2017)], RF, Moscow, RUDN Univ. Publ. House, 2017, pp. 448–453 (in Russian).

Многолетние изменения водного и ионного стока Северной Двины и Печоры*

А.Г. Георгиади, А.О. Даниленко

Проанализированы многолетние ряды годового и сезонного стока воды и главных ионов реки Северной Двины у села Усть-Пинеги и реки Печоры у села Усть-Цильмы. Выявлены долговременные фазы повышенных и пониженных значений водного стока, продолжительность которых составляла от 9 до 50 лет, и определены их основные характеристики. Последовательность и границы смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего стока на Северной Двине, а на Печоре – годового стока и половодья практически совпадали. Разница среднего годового и сезонного стока воды в фазы его повышенных и пониженных значений находилась в пределах от 11 до 41%, а стока ионов 5–36%. Ионный сток контрастных фаз, как правило, отличается меньше, чем водный сток. Это вызвано обратным характером зависимости концентрации ионов от расхода воды, за счет чего формируется своеобразная отрицательная обратная связь, стабилизирующая интенсивность химической денудации на водосборах этих рек и стока главных ионов в моря даже при заметных колебаниях водного стока.

Ключевые слова: Северная Двина, Печора, водный сток, ионный сток, многолетние фазы изменений, разностно-интегральные кривые.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60240) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №119021990093–8).*

Введение

В связи с глобальным потеплением, начало которого относят к 1970–1980 гг. [1], большое внимание уделяется вопросам исследования многолетних изменений геостока арктических рек. В его состав, согласно С.Д. Муравейскому [2], входят сток воды, тепла, наносов, химических и биологических веществ, которые весьма чувствительны к происходящим климатическим изменениям [3–10]. При этом многолетние изменения составляющих геостока арктических рек (так же, как и рек других регионов) характеризуются периодами (фазами, согласно принятой в России терминологии [11]) их повышенных и пониженных значений разной продолжительности. Синхронные длительные фазы одного знака могут охватывать большие территории [12]. Эти контрастные

фазы характеризуются специфическими относительно стабильными водным режимом рек и состоянием речных, озерных и морских экосистем [13, 14].

В многолетних изменениях стока воды выявляются длительные периоды, продолжительность которых может составлять от 10–15 лет до многих десятилетий [4, 8, 12, 15–17]. Они, последовательно сменяя друг друга, представляют собой важную особенность многолетней динамики гидрологических характеристик, обусловленных климатическими изменениями, а разница в стоке таких контрастных фаз чаще всего оказывается статистически значимой. В этом отношении уже исследованы годовой и сезонный сток воды не только арктических рек, но и рек других регионов мира [15, 18, 19].

Что касается изучения длительных контрастных фаз других составляющих геостока, то они изучены существенно меньше, хотя очевидно, что изменения стока воды вызывают отклик соответствующего элемента геостока, тем более отчетливый, чем теснее его связь с расходом воды. Помимо природно-климатических факторов его изменчивость может быть в разной степени связана с влиянием антропогенных воздействий.



ГЕОРГИАДИ
Александр Георгиевич
Институт географии РАН



ДАНИЛЕНКО
Алеся Олеговна
Гидрохимический институт

В связи с вышеизложенным, основное внимание в статье уделено исследованию долговременных (продолжительностью 10–15 и более лет) фаз повышенного и пониженного годового и сезонного стока воды и связанного с ним стока главных ионов крупнейших арктических рек Европейской территории России – Северной Двины и Печоры.

Краткая характеристика речных бассейнов Северной Двины и Печоры

Замыкающий створ бассейна реки Северной Двины расположен на входе в устьевую область в 137 км от морского края дельты у села Усть-Пинеги, ниже впадения реки Пинеги. Он замыкает водосбор площадью 348 000 км², что составляет 97,5% площади всего водосбора этой реки. Это типично равнинная таёжная река, в бассейне которой отсутствуют многолетнемерзлые грунты [20]. Среднегодовая температура воздуха, осредненная для ее водосбора, составляет 1,4 °С, а годовой слой атмосферных осадков – 576 мм. Пункт наблюдений на р. Печоре у с. Усть-Цильмы расположен на расстоянии 425 км от устья и замыкает площадь водосбора, равную 248 000 км² (около 77% площади водосбора). В отличие от бассейна р. Северной Двины, водосбор р. Печоры расположен в пределах северо-та-

ёжной и тундровой физико-географических зон. На севере и северо-востоке бассейна р. Печоры распространены многолетнемерзлые грунты [20]. Среднегодовая температура воздуха составляет здесь –3,3 °С, а годовой слой атмосферных осадков – 534 мм (картосхемы бассейнов рек представлены на рисунке 1).

Питание исследуемых рек смешанное, с преобладанием снегового. Средние многолетние расходы воды р. Северной Двины составили:

- осредненные за весь год – 3 305 м³/с;
- за половодье (апрель – июль) – 6 517 м³/с;
- за летне-осенний период (август – ноябрь) – 2 389 м³/с;
- за зимнюю межень (декабрь – март) – 1 020 м³/с.

В качестве окончания половодья был принят июль, хотя на его спаде в этом месяце формировались значительные паводки, что приводило к высокой водности, которая, в свою очередь, оказывала существенное

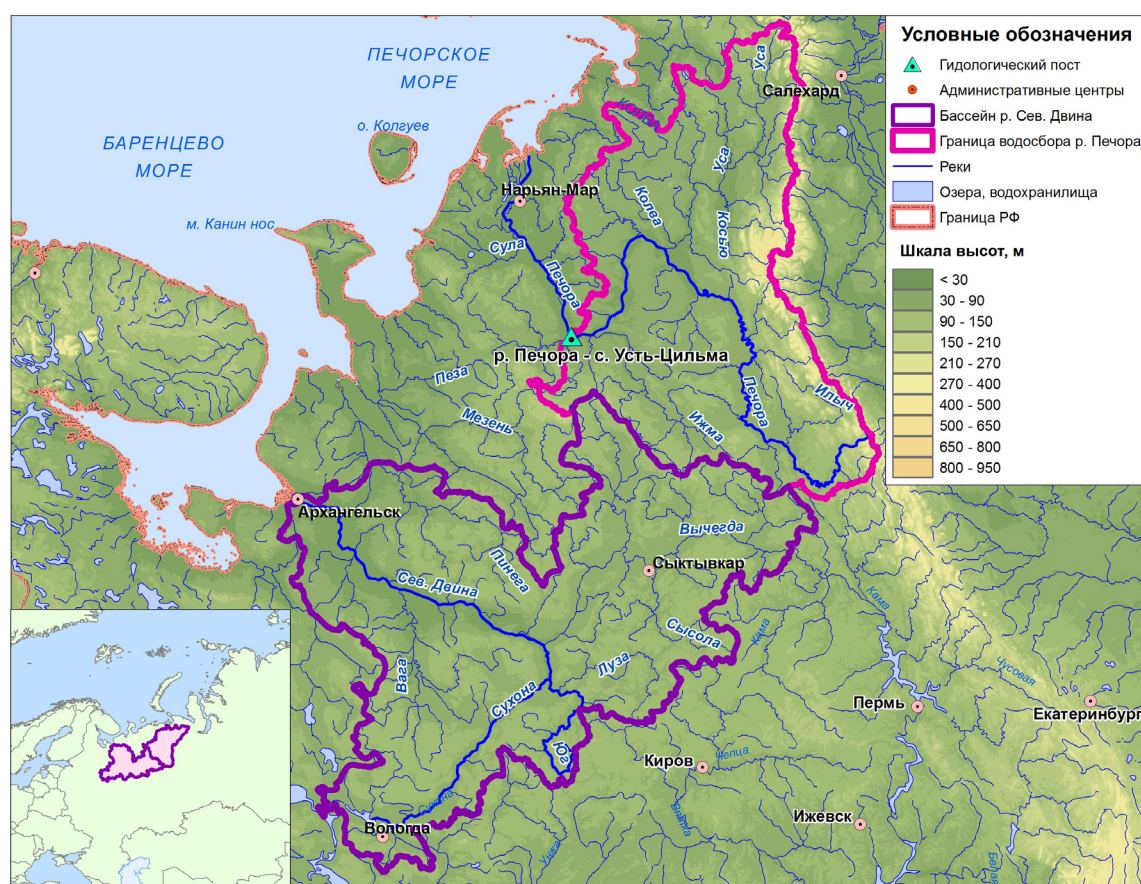


Рис. 1. Картосхема бассейнов Северной Двины и Печоры.

влияние на величину ионного стока. Границы гидрологических сезонов р. Печоры несколько отличаются: в створе с. Усть-Цильмы средний многолетний расход воды составляет:

- во время половодья (май – июнь) – 11 593 м³/с;
- за летне-осенний период (июль – октябрь) – 3 285 м³/с;
- в зимнюю межень (ноябрь – апрель) – 905 м³/с.

По ионно-солевому составу воды рек Северной Двины и Печоры относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция ($\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$), то есть генетически воды связаны с подстилающими осадочными породами и продуктами их выветривания [21]. Суммарное содержание растворенных минеральных веществ в воде р. Северной Двины позволяет классифицировать ее как воду средней (200–500 мг/дм³) или малой (100–200 мг/дм³) минерализации в зависимости от сезона [22]. В период зимней межени суммарное содержание главных ионов достигает 292–438 мг/дм³ (в среднем 375 мг/дм³), в летне-осенний период находится в пределах 99–337 мг/дм³. В период, соответствующий весеннему половодью, минерализация уменьшается до 57–144 мг/дм³ (в среднем 94 мг/дм³). Минерализация воды р. Печоры ниже и за год она может колебаться в пределах 18–256 мг/дм³, составляя в среднем 85 мг/дм³. Однако даже в период зимней межени, когда концентрации главных ионов достигают максимальных величин, вода р. Печоры остается маломинерализованной: 27–256 мг/дм³ (в среднем 170 мг/дм³). В период весеннего половодья содержание главных ионов так же, как и на Северной Двине, уменьшается до 18–157 мг/дм³ (в среднем 43 мг/дм³), в летне-осенний период находится в пределах 32–153 мг/дм³ (в среднем 82 мг/дм³).

Модуль ионного стока р. Северной Двины один из самых высоких среди рек водосбора Северного Ледовитого океана и составляет около 40 тонн/км² в год [23–25] при модуле водного стока, равном 9 л/с·км² [7]. Такой большой

модуль ионного стока обусловлен значительной водоносностью реки, отсутствием в ее бассейне многолетнемерзлых пород, а также тем, что сам бассейн в значительной мере сложен такими легко выщелачиваемыми породами, как гипсы и известняки [24]. Модуль ионного стока р. Печоры меньше, около 30 тонн/км² в год [24], что связано как с наличием многолетнемерзлых пород в ее бассейне, так и с особенностями влияния ее притоков. Право- и левобережные притоки р. Печоры существенно различаются по минерализации. Правобережные горные притоки маломинерализованные с водой устойчивого гидрокарбонатного состава, в то время как равнинным левобережным притокам свойственна более высокая минерализация и неустойчивость преобладающего анионного состава из-за наличия гипсового карста в их бассейнах. На ионном составе воды самой р. Печоры, за исключением участков непосредственно ниже впадения указанных притоков, это отражается мало, так как определяющими являются более многоводные правые притоки [20].

Материалы и методы исследования

Исследование изменений водного и ионного стока Северной Двины и Печоры выполнено по режимным данным о расходах воды и по гидрохимическим материалам, собранным Государственной наблюдательной сетью Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Начало наблюдений за химическим составом воды реки Печоры у села Усть-Цильмы датируется 1938 г. На реке Северной Двине у села Усть-Пинеги гидрохимические наблюдения начаты в 1947 г., но ряды наблюдений за расходом воды имеют значительно большую продолжительность – с 1882 г., а на р. Печоре у с. Усть-Цильмы – с 1932 г. Гидрохимическая информация, анализируемая в данной статье, получена по методикам, разработанным ФГБУ «Гидрохимический институт» [26].

Подход к анализу долговременных фаз в многолетних изменениях годового и сезонного стока воды, обусловленных изменениями климата, основан на использовании разностно-интегральных кривых и критериев статистической однородности средних значений стока, а также оценке характеристик выявленных фаз контрастной водности. Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений какой-либо характеристики от ее среднего многолетнего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений [11, 12]. Они позволяют выявить долговременные фазы, в течение которых существенно чаще встречаются значения характеристики ниже или выше ее среднемноголетнего значения.

Границы гидрологических сезонов были определены на основе гидрографов стока, построенных за весь период наблюдений. Также использовались сведения о среднемноголетних датах начала и окончания половодья и ледостава.

Как показали прежние исследования, временная граница смены долговременных фаз повышенных и пониженных значений стока воды, определенная на основе выявления минимальных и максимальных значений координат разностно-интегральных кривых и критериев однородности рядов по их средним значениям для контрастных фаз стока воды (параметрический критерий Стьюдента и непараметрический – Манна-Уитни-Пети), в подавляющем большинстве случаев совпадает, а различия средних значений стока оказываются статистически значимыми [8, 27, 28]. Те же границы контрастных фаз использовались и для расчета среднемноголетних величин ионного стока, так как его изменчивость тесно связана с гидрологическим режимом реки.

В условиях ограниченного набора гидрохимических данных, их неоднородности по частоте и срокам отборов за продолжительный период времени ионный сток рассчитывали корреляционно-регрессионным способом, учитывая характер связи между среднесуточным расходом воды (Q) и измеренными значениями концентраций (C). Такие зависимости можно рассматривать как сгла-

живающие функции, позволяющие, в известной мере, снизить ошибки расчетов, вызванные ошибками реальной практики гидрохимических полевых измерений и др. Были подобраны уравнения функций, описывающих связь гидрохимического режима с водным: поскольку для исследуемых рек характерно быстрое снижение минерализации в весенний период и нарастание – в межпаводковый, эта зависимость в большинстве случаев хорошо описывается степенными функциями, приведенными в *таблице 1*.

В замыкающем створе Северной Двины высокие значения индексов детерминации аппроксимирующих функций для большинства ионов и особенно для интегрального показателя – минерализации речной воды – косвенно свидетельствуют о ненарушенности природных процессов формирования гидрохимического режима этой реки. В то же время влияние антропогенного фактора на ионный состав воды р. Печоры, по всей видимости, выражено сильнее,

Таблица 1. Статистические характеристики зависимостей $C=f(Q)$ в р. Северной Двине у с. Усть-Пинеги и р. Печоре у с. Усть-Цильмы

Компоненты ионного стока	Число пар ($Q; C$)	Уравнение связи $C=f(Q)$	Индекс детерминации, r^2	Ошибка аппроксимации, %
р. Северная Двина у с. Усть-Пинеги				
Кальций	572	$C=2\,732.8 \cdot Q^{-0.566}$	0.88	15.7
Магний	572	$C=646.69 \cdot Q^{-0.567}$	0.73	27.2
Натрий и калий	202	$C=151.74 \cdot Q^{-0.446}$	0.25	97.4
Гидрокарбонаты	602	$C=7\,839.3 \cdot Q^{-0.562}$	0.89	14.2
Сульфаты	608	$C=6\,298.4 \cdot Q^{-0.653}$	0.77	24.8
Хлориды	608	$C=529.95 \cdot Q^{-0.591}$	0.66	30.2
Минерализация	568	$C=15\,112 \cdot Q^{-0.558}$	0.89	15.1
р. Печора у с. Усть-Цильмы				
Кальций	470	$C=501.68 \cdot Q^{-0.468}$	0.68	30.5
Магний	431	$C=118.25 \cdot Q^{-0.454}$	0.58	42.1
Натрий и калий	424	$C=58.656 \cdot Q^{-0.344}$	0.30	88.4
Гидрокарбонаты	515	$C=2912 \cdot Q^{-0.519}$	0.76	28.0
Сульфаты	508	$C=55.268 \cdot Q^{-0.25}$	0.25	48.5
Хлориды	513	$C=32.190 \cdot Q^{-0.273}$	0.34	38.7
Минерализация	434	$C=2\,784 \cdot Q^{-0.447}$	0.76	23.0

что нашло свое отражение в искажении естественной связи гидрохимического режима с водным. Величины индексов детерминации в целом ниже даже для «литогенных» катионов и анионов (гидрокарбонатов, ионов магния и кальция), а для «антропогенно чувствительных» ионов (хлоридов, сульфатов, одновалентных катионов), даже наиболее подходящая для аппроксимации степенная функция объясняет изменчивость расхода воды не более 25–34% изменчивости концентраций ионов.

Из-за неудовлетворительной аппроксимации гидрохимических данных степенными функциями по ряду главных ионов представляется более предпочтительным использование прямого метода расчета ионного стока. Однако детальный анализ внутригодового распределения концентраций показывает, что этот подход также будет давать большую ошибку. Так, например, в Северной Двине в зимний период и во время весеннего половодья концентрации одновалентных катионов колеблются в очень близких пределах, в то время как в водном стоке наблюдается шестикратная разница. В связи с этим было принято решение использовать для главных ионов единый подход, однако следует иметь в виду, что ошибка для полученных оценок изменчивости стока отдельных макрокомпонентов достаточно велика.

Используя ежедневные данные о среднесуточном расходе воды в качестве аргумента найденных функций, мы получили ежедневные ряды расчетных значений концентраций растворенных химических веществ и использовали их для вычислений суточного ионного стока (G) и его отдельных компонентов по

$$G = \sum_{i=1}^n W_i \cdot C_i,$$

где W_i – водный сток за сутки, км³; C_i – среднесуточная концентрация вещества, тонн/км³; n – множество суток в году; i – порядковый номер элемента множества n .

Для расчета ионного стока за год и за сезон суммировали значения суточного химического стока в соответствующие расчетные периоды. Сезонный ионный сток рассчитан с округлением до месяца.

Результаты и обсуждение

Последовательность смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего стока р. Северной Двины характеризовалась сходными чертами, тогда как их динамика для зимнего стока происходила во многом по-другому (рисунки 2, таблица 2).

Для летне-осеннего и годового стока с 1880-х гг. наблюдалась продолжительная фаза их повышенного стока, а для половодья ее предвляла относительно короткая фаза пониженного стока. С 1930-х гг. чередовались контрастные фазы, последовательно сменявшие одна другую, при этом общая продолжительность фаз пониженной водности была существенно больше, особенно для летне-осеннего стока. Для зимнего стока сначала наблюдалась фаза, для которой среднее значение стока было близко к норме летне-осеннего стока для всего периода наблюдений. После чего с начала 1900-х гг. наступила относительно короткая фаза пониженного стока, а ее в начале 1920-х гг. сменила фаза повышенного стока такой же продолжительности. Вслед за ней последовала достаточно продолжительная фаза пониженного стока, после которой в конце 1970-х гг. наступила столь же продолжительная фаза повышенного зимнего стока. Во многом асинхронный характер чередования контрастных фаз зимнего и летне-осеннего стока на Северной Двине заметно отличается.

На Печоре границы контрастных фаз стока половодья и годового стока практически совпадают (представлено на рисунке 3 и в таблице 2). При этом следует иметь в виду, что так же, как и на Северной Двине, последовательность смены и границы контрастных фаз зимнего стока существенно отличаются от динамики фаз стока других сезонов и годового стока.

На Печоре выявляются лишь два длительных периода, когда фазы зимнего стока и годового и половодного стока совпадали по знаку. В 1932–1947 гг. (когда наблюдался их пониженный сток) и в 1989–2008 гг. (повышенный сток). При этом в течение почти сорока лет (1950–1988 гг.) для зимнего стока не наблюдалось сколько-нибудь длительных периодов, средний сток которых существенно отличался от его среднего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений. Также и многолетняя динамика контрастных фаз стока летне-осеннего сезона отличалась от динамики фаз стока других сезонов года и года в целом. Для стока этого сезона сначала наблю-

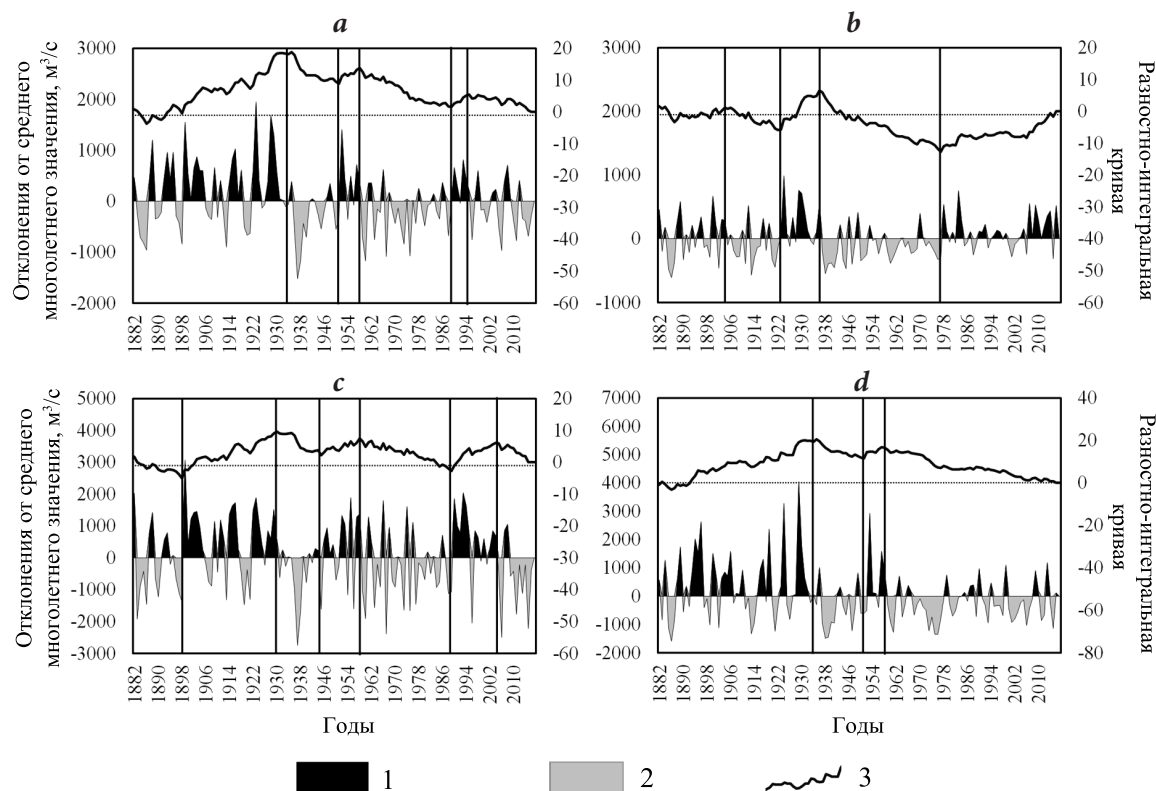


Рис. 2. Сток р. Северной Двины у с. Усть-Пинега: в среднем за год (а), в зимний период (b), в период половодья (с) и в летне-осенний период (d) в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой. Отклонения от среднего многолетнего значения: 1 – положительные, 2 – отрицательные, 3 – разностно-интегральная кривая. Вертикальные линии – границы фаз контрастной водности.

далась фаза пониженного стока, которая в 1962 г. сменилась на продолжительную фазу повышенного стока. При этом длительные фазы одного знака за летне-осенний сезон, половодье и год наблюдались лишь в фазу их повышенного стока в 1981–2008 гг., летне-осеннего и зимнего стока также в фазу их повышенных значений в 1989–2009 гг.

На Северной Двине и Печоре в течение относительно длительных периодов фазы одного знака наблюдались:

- для половодного стока – в 1935–1945 гг., 1967–1980 гг. и 1989–2004 гг.;
- для зимнего стока в 1936–1947 гг. и 1989–2016 гг.;
- для летне-осеннего стока в 1935–1961 гг. и 2009–2016 гг.;
- для годового стока лишь в 1934–1947 гг.

Продолжительность контрастных фаз на Северной Двине и на Печоре соответственно варьирует в пределах:

- для стока половодья – 9–32 и 11–25 лет;
- для летне-осеннего стока – 16–49 и 29–49 лет;
- для зимнего стока – 14–41 года и 17–28 лет;
- для годового стока – 16–50 и 17–28 лет.

Разница среднего стока воды для долговременных фаз его повышенных и пониженных значений (относительно значений характерных для фаз по-

ниженного стока) составляет соответственно на Северной Двине и Печоре для годового стока 17 и 11%; зимнего – 34 и 41%; летне-осеннего – 38 и 12%; стока половодья – 16 и 13% (данные представлены в таблице 3).

Так как связь гидрохимического режима с водным на реках Северной Двине и Печоре сохраняется даже в условиях антропогенной нагрузки, чередование периодов повышенного и пониженного стока воды должно было сказаться как на общем объеме ионного стока, так и на стоке отдельных его составляющих по сезонам годового цикла (таблицы 4 и 5).

В замыкающем створе р. Северной Двины изменения годового химического стока при переходе от фазы повышенного водного стока к фазе пониженного водного стока характеризуется сравнительно менее выраженными различиями по сравнению со стоком воды. Слабая реакция ионного стока объясняется, с одной стороны, обратным харак-

Таблица 2. Характеристика контрастных фаз пониженного и повышенного водного стока рек Северной Двины у с. Усть-Пинеги и Печоры у с. Усть-Цильмы

Фазы водного стока	Границы фаз, календарные годы, (продолжительность фаз, лет), средний расход воды, м³/с			
	Весеннее половодье	Летне-осенний период	Зимняя межень	Год
р. Северная Двина у с. Усть-Пинеги				
Фазы пониженного водного стока	1882–1898 (17) 6 257	1936–1951 (16) 1 922	1905–1922 (18) 899	1936–1951 (16) 2 930
	1931–1945 (15) 5 985	1959–2016 (48) 2 108	1937–1977 (41) 874	1959–1989 (31) 3 085
	1959–1989 (31) 6 128	—	—	1996–2016 (21) 3 146
	2006–2016 (11) 5 833	—	—	—
Фазы повышенного водного стока	1899–1930 (32) 7 069	1887–1935 (49) 2 815	1923–1936 (14) 1 296	1886–1935 (50) 3 560
	1946–1958 (9) 6 919	1952–1958 (7) 3 054	1978–2016 (29) 1 121	1952–1958 (7) 3 738
	1990–2005 (16) 7 090	—	—	1990–1995 (6) 3 698
р. Печора у с. Усть-Цильмы				
Фазы пониженного водного стока	1936–1956 (21) 10 767	1933–1961 (29) 3 094	1933–1949 (17) 736	1932–1948 (17) 3 204
	1969–1980 (12) 10 708	—	—	1967–1980 (24) 3 349
Фазы повышенного водного стока	1957–1967 (11) 12 271	1962–2010 (49) 3 460	1989–2016 (28) 1 036	1949–1966 (18) 3 564
	1981–2015 (25) 12 148	—	—	1981–2008 (28) 3 673
Фаза водного стока, близкого к его среднему многолетнему значению	—	—	1950–1988 (39) 885	—

тером зависимости концентрации ионов от расхода воды. С другой стороны, фаза пониженного или повышенного годового стока складывается из совокупностей фаз пониженного или повышенного стока в отдельные сезоны, противоположно направленное изменение которых может нивелировать изменения химического стока за год в целом.

В р. Печоре у с. Усть-Цильмы, напротив, изменения ионного стока при смене фаз водности выражены хорошо и становятся особенно заметны в период зимней межени, повторяя тенденции, характерные для

водного стока. Однако, как и в случае с Северной Двиной, различия в ионном стоке между контрастными фазами проявляются значительно слабее, чем в водном стоке. Прирост значений стока главных ионов в фазы повышенной водности возрастает на 24–36% в зависимости от иона, в то время как расход воды в эти же периоды увеличивается на 41%. В остальные гидрологические сезоны различия между контрастными фазами сглажены. Так, увеличение расхода воды на 12% в летне-осенний период и на 13% – в период весеннего половодья сопровождается увеличением стока главных ионов на 10–14 и 11–15% соответственно. В целом же более слабая изменчивость химического стока р. Печоры на фоне более заметной изменчивости водного стока обусловлена теми же причинами, что и для р. Северной Двины.

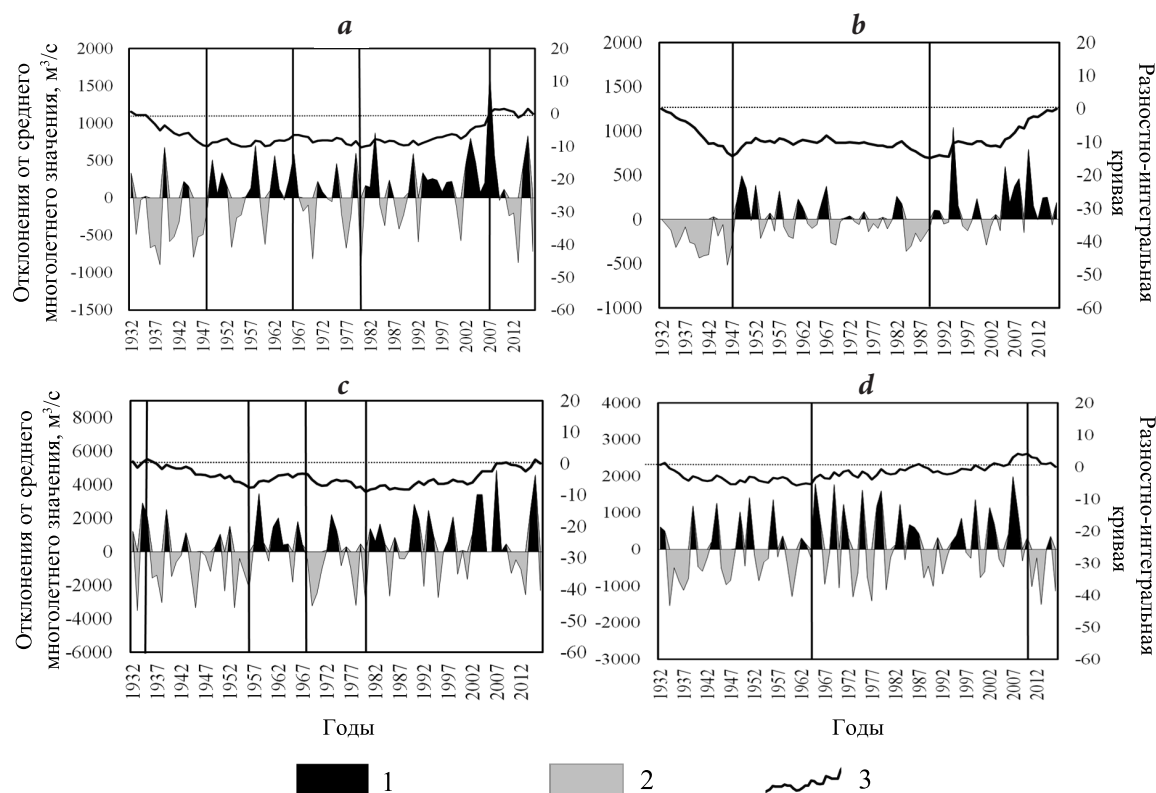


Рис. 3. Сток р. Печоры у с. Усть-Цильмы: в среднем за год (а), в зимний период (b), в период половодья (с) и в летне-осенний период (d) в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой. Отклонения от среднего многолетнего значения: 1 – положительные, 2 – отрицательные, 3 – разностно-интегральная кривая. Вертикальные линии – границы фаз контрастной водности.

Таблица 3. Средние значения расходов воды р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги и р. Печоры у с. Усть-Цильмы для контрастных фаз ($\text{м}^3/\text{с}$), их абсолютная (D) и относительная разница ($D_{\text{отн}}$, относительно водного стока в фазу его пониженных значений)

Фазы водного стока	Весеннее половодье	Летне-осенний период	Зимняя межень	Год
р. Северная Двина у с. Усть-Пинеги				
Фаза повышенного водного стока	7 051	2 845	1 178	3 593
Фаза пониженного водного стока	6 085	2 062	882	3 067
$D, \text{м}^3/\text{с}$	966	783	296	526
$D_{\text{отн}}, \%$	16	38	34	17
р. Печора у с. Усть-Цильмы				
Фаза повышенного водного стока	12 179	3 460	1 036	3 631
Фаза пониженного водного стока	10 745	3 094	736	3 270
$D, \text{м}^3/\text{с}$	1 434	367	300	361
$D_{\text{отн}}, \%$	13	12	41	11

Внутригодовое распределение объема ионного стока при переходе от фазы пониженной к повышенной водности изменяется мало. В р. Северной Двине на период весеннего снегового половодья (с учетом летних дождевых паводков в июле) приходится приблизительно 43% годового ионного стока, что существенно меньше соответствующей доли годового

вого стока воды (65%). В фазу пониженной водности доля ионного стока летне-осеннего периода близка к доле зимней межени (29 и 27%). В фазу повышенной водности эти различия более выражены: на летне-осенний период приходится 32%, а на

Таблица 4. Ионный сток р. Северной Двины в створе с. Усть-Пинеги в контрастные фазы водного стока (в таблице приведены среднеемноголетнее значение и стандартное отклонение выборочных данных $G_{cp} \pm \sigma$)

Фаза водности	Ионный сток ($G_{cp} \pm \sigma$), млн тонн в год и сезоны						
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+} + K^{+}$	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	Σ ионов
Год в целом							
пониженного водного стока	2.69±0.19	0.61±0.04	0.71±0.05	7.82±0.53	3.31±0.22	0.45±0.03	15.84±1.08
повышенного водного стока	2.89±0.23	0.66±0.05	0.76±0.06	8.41±0.68	3.54±0.28	0.48±0.04	16.92±1.30
$\Delta G_{cp}, \%$	+7.1	+6.5	+6.8	+7.5	+6.8	+6.5	+6.8
Половодье							
пониженного водного стока	1.17±0.08	0.26±0.02	0.30±0.02	3.36±0.23	1.41±0.09	0.19±0.01	6.74±0.46
повышенного водного стока	1.24±0.08	0.27±0.02	0.32±0.02	3.57±0.24	1.50±0.10	0.20±0.01	7.10±0.49
$\Delta G_{cp}, \%$	+6.4	+5.3	+6.1	+6.3	+6.0	+5.8	+5.2
Летне-осенний период							
пониженного водного стока	0.78±0.10	0.18±0.02	0.21±0.03	2.27±0.30	0.96±0.12	0.13±0.02	4.62±0.59
повышенного водного стока	0.90±0.17	0.21±0.04	0.24±0.04	2.66±0.53	1.10±0.20	0.15±0.02	5.40±0.95
$\Delta G_{cp}, \%$	+15.0	+13.7	+14.5	+17.1	+14.4	+13.9	+16.9
Зимняя межень							
пониженного водного стока	0.72±0.07	0.17±0.01	0.19±0.02	2.11±0.19	0.90±0.08	0.12±0.01	4.29±0.39
повышенного водного стока	0.80±0.08	0.19±0.02	0.21±0.02	2.33±0.24	0.99±0.10	0.14±0.01	4.73±0.48
$\Delta G_{cp}, \%$	+10.8	+9.9	+10.4	+10.6	+10.3	+10.0	+10.4

зимнюю межень – 28% годового ионного стока, что в три раза выше соответствующей доли водного стока. А вот доля водного стока в летне-осенний период, которая составляет от 26.5% (для фазы повышенного стока) до 22.5% (для фазы пониженного стока) и ионного стока отличаются между собой не столь значительно.

В р. Печоре наибольшая доля ионного стока «литогенных» катионов и анионов (гидрокарбонатов, ионов кальция и магния) приходится на период летне-осенней межени, составляя в фазу пониженной водности 38–39% от общего стока, а в фазу повышенной водности его доля несколько снижается – до 37%. В период весеннего половодья сток

«литогенных» ионов несколько ниже (33–37% в фазу пониженной водности и 32–36% в фазу повышенной водности). Наименьший сток гидрокарбонатов, кальция и магния наблюдается в период зимней межени (25–28%), но при этом в фазу повышенной водности его доля, в отличие от других гидрологических сезонов, возрастает (27–31%). Наибольшая доля стока ионов, чувствительных к антропогенному воздействию (сульфатов, хлоридов, одновалентных катионов), наблюдается в период весеннего половодья (40–45% в фазу пониженной водности и 39–44% в фазу повышенной водности). Несколько ниже эти значения в период летне-осенней межени (37–38%) при сохранении общей тенденции сокращения стока в эти периоды при переходе от фазы пониженного к фазе повышенного водного стока (36–37%). В период зимней межени, на который приходится наименьшая часть ионного стока, при переходе от фазы пониженного к фазе повышенного водного стока

Таблица 5. Ионный сток р. Печоры в створе с. Усть-Цильмы в контрастные фазы пониженного и повышенного водного стока (в таблице приведены среднемноголетнее значение и стандартное отклонение выборочных данных $G_{cp} \pm \sigma$)

Фаза водности	Ионный сток ($G_{cp} \pm \sigma$), млн тонн в год и сезоны						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ ионов
Год в целом							
пониженного водного стока	0.99±0.10	0.25±0.03	0.38±0.04	3.73±0.39	0.66±0.08	0.29±0.03	6.51±0.69
повышенного водного стока	1.11±0.08	0.29±0.02	0.44±0.04	4.17±0.29	0.76±0.08	0.34±0.03	7.33±0.58
ΔG_{cp} , %	12.3	13.0	13.9	11.7	15.2	15.1	12.7
Весеннее половодье							
пониженного водного стока	0.34±0.04	0.09±0.01	0.15±0.02	1.23±0.13	0.29±0.04	0.13±0.02	2.32±0.27
повышенного водного стока	0.38±0.03	0.10±0.01	0.17±0.02	1.36±0.10	0.34±0.04	0.15±0.02	2.59±0.22
ΔG_{cp} , %	11.2	12.1	13.1	10.6	14.7	14.5	11.7
Летне-осенний период							
пониженного водного стока	0.38±0.05	0.10±0.01	0.14±0.02	1.44±0.19	0.24±0.05	0.11±0.02	2.49±0.37
повышенного водного стока	0.42±0.06	0.11±0.02	0.16±0.03	1.57±0.21	0.27±0.06	0.12±0.03	2.75±0.42
ΔG_{cp} , %	9.6	10.7	12.0	8.9	14.4	14.1	10.2
Зимняя межень							
пониженного водного стока	0.26±0.03	0.06±0.01	0.08±0.01	1.06±0.11	0.12±0.02	0.05±0.01	1.66±0.20
повышенного водного стока	0.33±0.02	0.08±0.01	0.11±0.01	1.29±0.08	0.16±0.02	0.07±0.01	2.08±0.16
фаза водного стока, близкого к его среднему многолетнему значению	0.30±0.02	0.07±0.01	0.10±0.01	1.20±0.09	0.14±0.02	0.07±0.01	1.92±0.16
ΔG_{cp} , %	23.8	26.6	29.8	22.0	35.6	34.8	25.3

также отмечается увеличение его доли с 18–22% до 21–25%.

Вероятно, более существенные изменения ионного стока при переходе между фазами водности в Печоре по сравнению с Северной Двиной (особенно в период зимней межени) связаны с увеличением влияния на химический состав воды Печоры в контрастную фазу повышенного водного стока более минерализованных равнинных левобережных притоков (Пижма, Ижма, Цильма, Сула и др. реки), протекающих вне территорий распространения многолетнемерзлых пород. Косвенно это подтверждается наиболее выраженным увеличением стока сульфатов легко выщелачиваемых коренных пород южной части Тимана.

Заключение

На основе анализа многолетних рядов годового и сезонного стока воды р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги и р. Печоры у с. Усть-Цильмы, охватывающих соответственно периоды начиная с 1882 г. и с 1932 г. по 2016 г., выявлены долговременные фазы их повышенных и пониженных значений. Последовательность и границы смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего

стока на Северной Двине, а на Печоре – годового стока и половодья, практически совпадали. Динамика фаз зимнего стока (на Северной Двине), зимнего и летне-осеннего стока (на Печоре) существенно отличалась от характера многолетних изменений стока других сезонов и годового стока. На Печоре в течение почти сорока лет (1950–1988) для зимнего стока не были выявлены сколько-нибудь длительные периоды, средний сток которых существенно отличался от его среднего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений. На Северной Двине и Печоре в течение относительно длительных периодов фазы одного знака наблюдались:

- для половодного стока – в 1935–1945 гг., 1967–1980 гг. и 1989–2004 гг.;
- для зимнего стока – в 1936–1947 гг. и 1989–2016 гг.;
- для летне-осеннего стока – в 1935–1961 гг. и 2009–2016 гг.;
- для годового стока лишь в 1934–1947 гг.

Продолжительность контрастных фаз на Северной Двине и на Печоре соответственно варьирует в пределах:

- для стока половодья – 9–32 и 11–25 лет;
- для летне-осеннего стока – 16–49 и 29–49 лет;

- для зимнего стока – 14–41 года и 17–28 лет;
- для годового стока – 16–50 и 17–28 лет.

Разница среднего стока воды для долговременных фаз его повышенных и пониженных значений (относительно значений, характерных для фаз пониженного стока) соответственно на Северной Двине и Печоре составляет:

- для годового стока 17 и 11%;
- для зимнего стока – 34 и 41%;
- для летне-осеннего стока – 38 и 12%;
- для стока половодья – 16 и 13%.

Наибольшие различия стока ионов в контрастные фазы водного стока характерны в р. Северной Двине для летне-осеннего периода, а в р. Печоре – для зимней межени. Но в целом для обеих крупных рек бассейна Северного Ледовитого океана характерно, что разница их ионного стока между контрастными фазами меньше, чем для водного стока. Такая реакция химического стока на изменения стока воды вызвана обратным характером зависимости концентрации ионов от расхода воды, за счет чего формируется своеобразная отрицательная обратная связь, стабилизирующая интенсивность химической денудации на водосборах этих рек и стока главных ионов в моря, даже при заметных колебаниях водного стока.

В целом можно сделать вывод, что климатические изменения, заметно трансформирующие водный сток, оказывают существенно меньшее воздействие на сток макрокомпонентов природных вод. Можно отметить некоторое относительное динамическое постоянство геохимической нагрузки на моря Северного Ледовитого океана водами Северной Двины и Печоры независимо от амплитуд колебаний их водности в контрастные фазы.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме, РФ, Москва, Росгидромет, 2014, 94 с. (http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_teh.pdf).
2. С.Д. Муравейский
Реки и озера: гидробиология, сток, СССР, Москва, Географгиз, 1960, 388 с.
3. Водные ресурсы России и их использование, под ред. И.А. Шикломанова, РФ, Санкт-Петербург, Изд. ГГИ, 2008, 600 с.
4. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, И.П. Милокова, А.В. Кислов, О.А. Анисимов, Е.А. Барабанова, Е.А. Какутина, О.О. Бородин
Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России, часть 1: бассейн реки Лены, РФ, Москва, Макс Пресс, 2011, 179 с.
5. *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies*, Eds C.R. Goldman, M. Kumagai, R.D. Robarts, USA, Malden, Wiley-Blackwell, 2013, 496 pp. DOI: 10.1002/9781118470596.
6. М.П. Смирнов
Органические вещества и минерализация речных вод России, СНГ, Балтии, РФ, Ростов-на-Дону, НОК, 2015, 358 с.
7. D.V. Magritsky, N.L. Frolova, V.M. Evstigneev, E.S. Povalishnikova, M.B. Kireeva, O.M. Pakhomova
Polarforschung, 2018, 87(2), 177. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
8. A.G. Georgiadi, E.A. Kashutina, I.P. Milyukova
Polarforschung, 2018, 87(2), 167. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.167.
9. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, Ser. Springer Environmental Science and Engineering, Eds P.Ya. Groisman, G. Gutman, USA, New York, Springer Dordrecht, 2013, 360 pp. DOI: 10.1007/978-94-007-4569-8.
10. D. Yang, D. Kane
Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, Eds D. Yang, D.L. Kane, CH, Cham, Springer Cham, 2021, 914 pp. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.
11. Г.Г. Андреев
В Труды III Всесоюз. гидролог. съезда, в 10 тт., т. 2, Секция расчетов и прогнозов стока, СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1959, с. 3–50.
12. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, И.П. Милокова, Е.А. Какутина, Е.А. Барабанова
Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России, ч. 2, Бассейны рек Волги и Дона, РФ, Москва, Макс Пресс, 2014, 214 с.
13. R.P. North, D.M. Livingstone, R.E. Hari, O. Köster, P. Niederhauser, R. Kipfer
Inland Waters, 2013, 3(3), 341. DOI: 10.5268/IW-3.3.560.
14. S.N. Rodionov, J.E. Overland
ICES J. Mar. Sci., 2005, 62(3), 328. DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.01.013.
15. А.Г. Георгиади, И.П. Милокова, Е.А. Какутина
Водные ресурсы, 2020, 47(6), 651. DOI: 10.31857/S0321059620060061.
16. X. Shi, T. Qin, H. Nie, B. Weng, Sh. He
Int. J. Environ. Res. Pub. He., 2019, 16(8), 1469. DOI: 10.3390/ijerph16081469.
17. Научно-прикладной справочник: многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации, РФ, Санкт-Петербург, ООО «РИАЛ», 2021, 190 с.
18. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, Е.А. Какутина
Доклады Академии наук, 2019, 488(5), 539. DOI: 10.31857/S0869-5652488539-544.
19. S. Sharma, P.K. Singh
Climate, 2017, 5(1), 18. DOI: 10.3390/cli5010018.
20. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 3, Северный край, под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской, СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1972, 663 с.
21. О.А. Алекин
Основы гидрохимии, СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1970, 445 с.
22. А.М. Никаноров
Гидрохимия: Учебник, Россия, Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2001, 444 с.
23. А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов
Реки России, ч. 2, реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология), РФ, Ростов-на-Дону, НОК, 2010, 200 с.
24. Ю.С. Даченко, Л.Е. Ефимова, М.Б. Заславская, О.М. Пахомова
Российские полярные исследования, 2016, №1(23), 12. (<http://old.aari.ru/misc/publicat/sources/RPR-23.pdf>).
25. В.Ф. Бреховских, З.В. Волкова, Д.В. Ломова
Метеорология и гидрология, 2004, №10, 87.
26. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши, ч. 1, под ред. Л.В. Боевой, РФ, Ростов-на-Дону, НОК, 2009, 1032 с.
27. A.N. Pettitt
J. R. Stat. Soc. C-Appl., 1979, 28(2), 126. DOI: 10.2307/2346729.
28. S.N. Rodionov
Geophys. Res. Lett., 2004, 31(9), 1. DOI: 10.1029/2004GL019448.

English

The Long-Term Changes in Water and Ions Flux of Northern Dvina and Pechora*

Aleksandr G. Georgiadi
RAS Institute of Geography
29/4 Staromonetny Lane,
Moscow, 119017, Russia
georgiadi@igras.ru

Alesya O. Danilenko
Lomonosov Hydrochemical Institute
198 Stachki Ave., Rostov-on-Don,
344090, Russia
a.danilenko@gidrohim.com

Abstract

The long-term data sets of the annual and seasonal water flows and the major ions fluxes of the Northern Dvina River at the village of Ust-Pinega and Pechora River at the village of Ust-Tsilma were analyzed. Long-term phases of increased and decreased values of water runoff were identified, the duration of which ranged from 9 to 50 years, and their main characteristics were determined. The sequence and boundaries of the change in the contrasting phases of the annual water flow, the snowmelt flood flow and the summer-autumn flow on the Northern Dvina River and the annual water flow and snowmelt flood flow on the Pechora River practically coincided. The difference between the average annual and seasonal water flow in the phases of its increased and decreased values ranged from 11 to 41%, and the ion fluxes were in the range of 5–36%. The ion flux of contrast phases, as a rule, differs less than the water flow. This is due to the inverse nature of the dependence of the concentration of ions on the daily water discharges, because of which a kind of negative feedback is formed, stabilizing the intensity of chemical denudation in the watersheds of these rivers and the flux of the main ions into the seas, even with noticeable fluctuations in water flow.

Keywords: the Northern Dvina River, the Pechora River, water flow, ion flux, long-term phases of changes, cumulative deviation curves.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60240) and Federal Budget allocations (state target 119021990093–8).*

Images & Tables

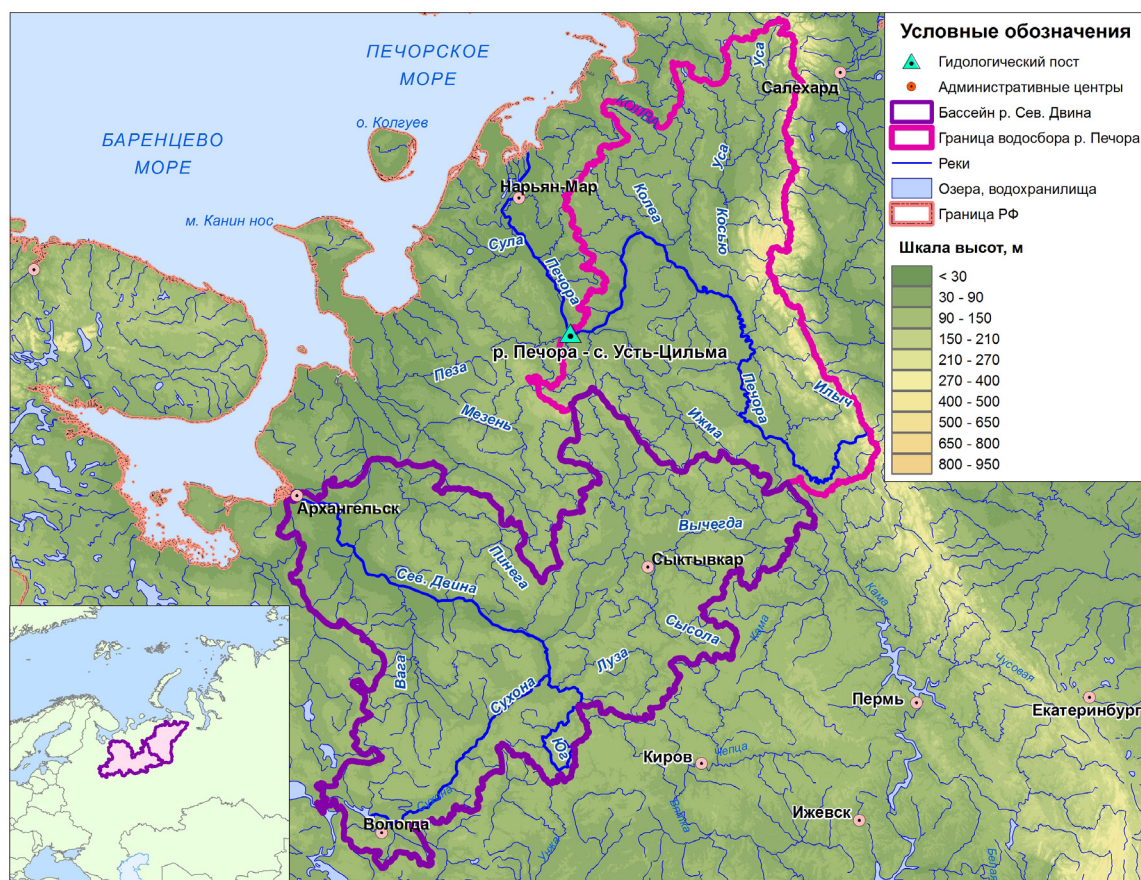


Fig. 1. Map of the Northern Dvina and Pechora rivers' basins.

Table 1. Statistical characteristics of dependences $C=f(Q)$ in Northern Dvina River near Ust-Pinega and the Pechora River near Ust-Tsilma

Ion fluxes components	Number of pairs ($Q; C$)	Relationship equation $C=f(Q)$	Index of determination, r_2	Approximation error, %
The Northern Dvina River near Ust-Pinega				
Calcium	572	$C=2\,732.8 \cdot Q^{-0.566}$	0.88	15.7
Magnesium	572	$C=646.69 \cdot Q^{-0.567}$	0.73	27.2
Sodium and Potassium	202	$C=151.74 \cdot Q^{-0.446}$	0.25	97.4
Bicarbonates	602	$C=7\,839.3 \cdot Q^{-0.562}$	0.89	14.2
Sulfates	608	$C=6\,298.4 \cdot Q^{-0.653}$	0.77	24.8
Chlorides	608	$C=529.95 \cdot Q^{-0.591}$	0.66	30.2
Mineralization	568	$C=15\,112 \cdot Q^{-0.558}$	0.89	15.1
The Pechora River near Ust-Tsilma				
Calcium	470	$C=501.68 \cdot Q^{-0.468}$	0.68	30.5
Magnesium	431	$C=118.25 \cdot Q^{-0.454}$	0.58	42.1
Sodium and Potassium	424	$C=58.656 \cdot Q^{-0.344}$	0.30	88.4
Bicarbonates	515	$C=2912 \cdot Q^{-0.519}$	0.76	28.0
Sulfates	508	$C=55.268 \cdot Q^{-0.25}$	0.25	48.5
Chlorides	513	$C=32.190 \cdot Q^{-0.273}$	0.34	38.7
Mineralization	434	$C=2\,784 \cdot Q^{-0.447}$	0.76	23.0

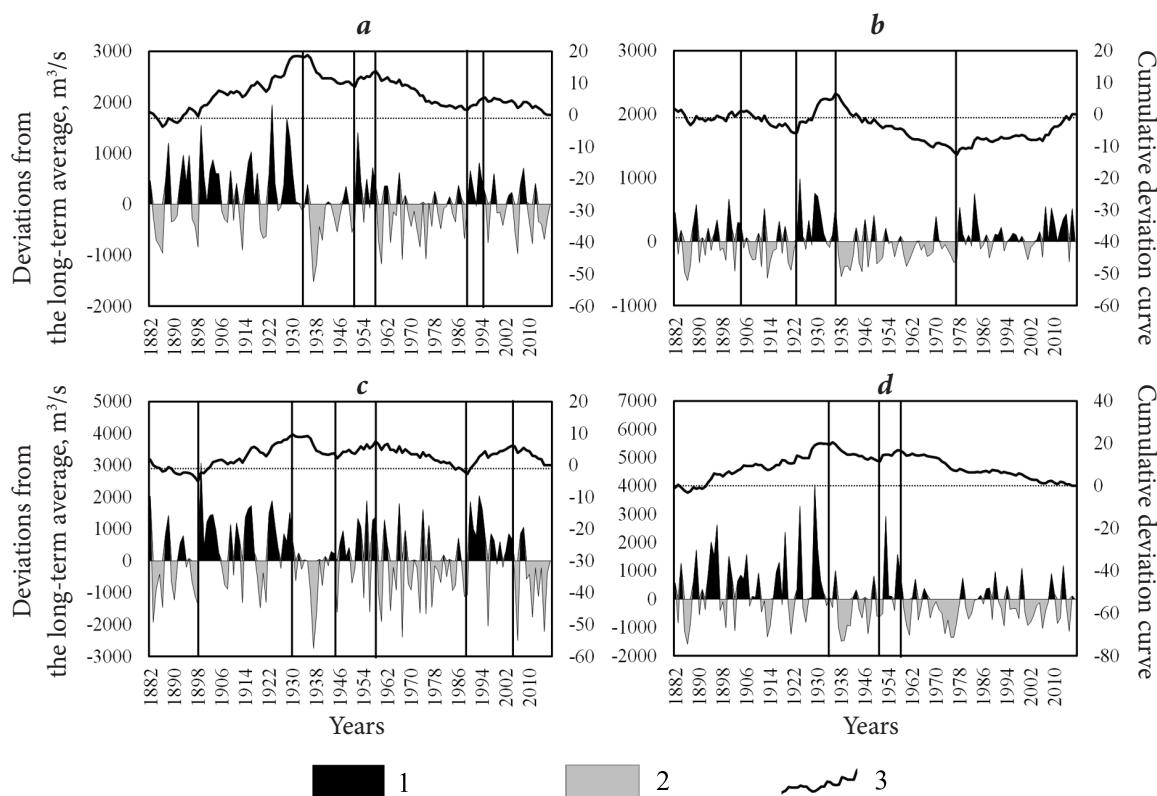


Fig. 2. Water flow of the Northern Dvina River near Ust-Pinega during the year (a), winter season (b), snowmelt flood season (c) and summer-autumn season (d) in deviations from the long-term average and in the coordinates of the cumulative deviation curve. Deviations from the average long-term value: 1 – positive, 2 – negative, 3 – cumulative deviation curve. Vertical lines are the limits of the contrasting water flow phases.

Table 2. Characteristics of the contrasting phases of the increased and decreased water flow of the Northern Dvina River near Ust-Pinega and Pechora River near Ust-Tsilma

Phases of water flow	Phases limits, calendar years, (phases duration, years), average discharge, m ³ per second			
	snowmelt flood flow	summer-autumn flow	winter flow	annual flow
The Northern Dvina River near Ust-Pinega				
Phases of decreased water flow	1882–1898 (17) 6 257	1936–1951 (16) 1 922	1905–1922 (18) 899	1936–1951 (16) 2 930
	1931–1945 (15) 5 985	1959–2016 (48) 2 108	1937–1977 (41) 874	1959–1989 (31) 3 085
	1959–1989 (31) 6 128	—	—	1996–2016 (21) 3 146
	2006–2016 (11) 5 833	—	—	—
Phases of increased water flow	1899–1930 (32) 7 069	1887–1935 (49) 2 815	1923–1936 (14) 1 296	1886–1935 (50) 3 560
	1946–1958 (9) 6 919	1952–1958 (7) 3 054	1978–2016 (29) 1 121	1952–1958 (7) 3 738
	—	—	—	1990–1995 (6) 3 698
The Pechora River near Ust-Tsilma				
Phases of decreased water flow	1936–1956 (21) 10 767	1933–1961 (29) 3 094	1933–1949 (17) 736	1932–1948 (17) 3 204
	1969–1980 (12) 10 708	—	—	1967–1980 (24) 3 349
Phases of increased water flow	1957–1967 (11) 12 271	1962–2010 (49) 3 460	1989–2016 (28) 1 036	1949–1966 (18) 3 564
	1981–2015 (25) 12 148	—	—	1981–2008 (28) 3 673
The phase of water flow, close to its average long-term value	—	—	1950–1988 (39) 885	—

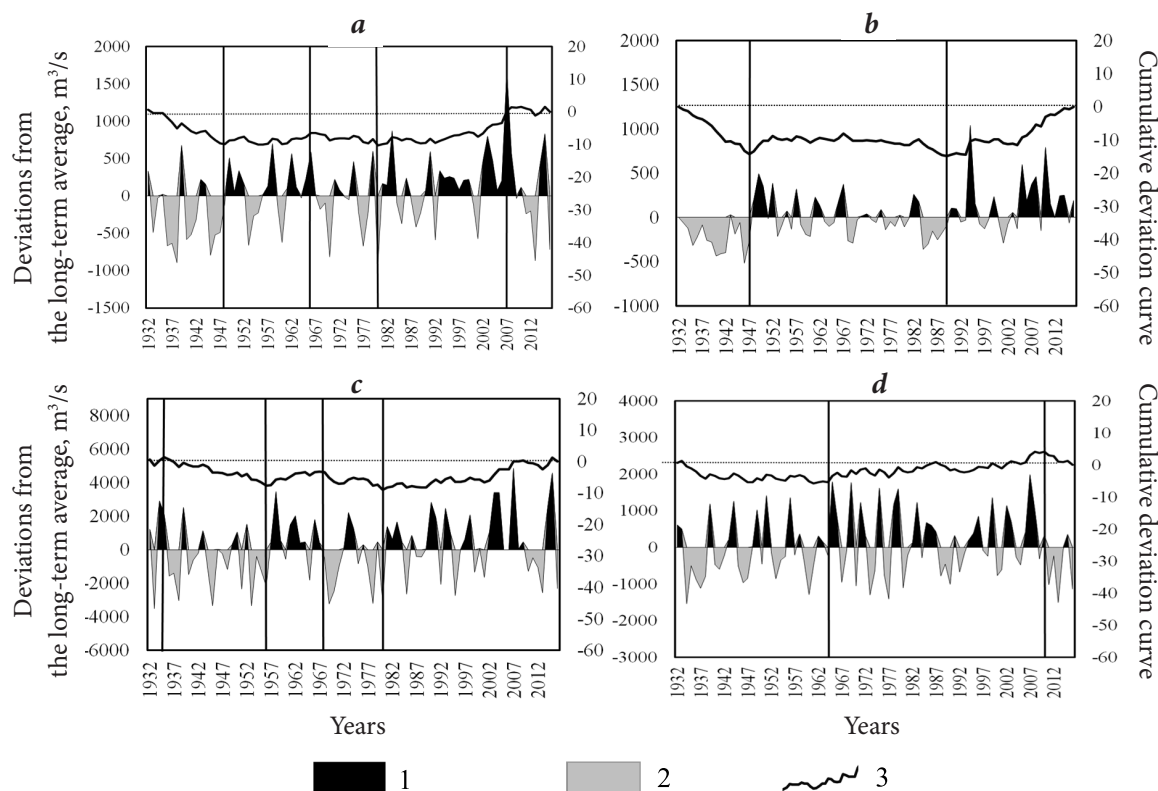


Fig. 3. Water flow of the Pechora River near Ust-Tsilma during the year (a), winter season (b), snowmelt flood season (c) and summer-autumn season (d) in deviations from the long-term average and in the coordinates of the cumulative deviation curve. Deviations from the average long-term value: 1 – positive, 2 – negative, 3 – cumulative deviation curve. Vertical lines are the limits of the contrasting water flow phases.

Table 3. Average values of water discharges of the Northern Dvina River near Ust-Pinega and the Pechora River near Ust-Tsilma for contrasting phases (in m³ per second), their absolute (D) and relative difference (D_{rel} , relative to the phase of decreased water flow)

Phases of water flow	Snowmelt flood flow	Summer-autumn flow	Winter flow	Annual flow
The Northern Dvina River near Ust-Pinega				
Phases of increased water flow	7 051	2 845	1 178	3 593
Phases of decreased water flow	6 085	2 062	882	3 067
D , m ³ /s	966	783	296	526
D_{rel} , %	16	38	34	17
The Pechora River near Ust-Tsilma				
Phases of increased water flow	12 179	3 460	1 036	3 631
Phases of decreased water flow	10 745	3 094	736	3 270
D , m ³ /s	1 434	367	300	361
D_{rel} , %	13	12	41	11

Table 4. Major ions flux of the Northern Dvina River near the Ust-Pinega in contrasting phases of decreased and increased water flow (the table shows the long-term average value and standard deviation of sample data $G_{cp} \pm \sigma$)

Phases of:	Major ions flux ($G_{cp} \pm \sigma$), million tons per year and seasons						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _{ионов}
Annual flow							
decreased water flow	2.69±0.19	0.61±0.04	0.71±0.05	7.82±0.53	3.31±0.22	0.45±0.03	15.84±1.08
increased water flow	2.89±0.23	0.66±0.05	0.76±0.06	8.41±0.68	3.54±0.28	0.48±0.04	16.92±1.30
ΔG_{av} , %	+7.1	+6.5	+6.8	+7.5	+6.8	+6.5	+6.8
Snowmelt flood flow							
decreased water flow	1.17±0.08	0.26±0.02	0.30±0.02	3.36±0.23	1.41±0.09	0.19±0.01	6.74±0.46
increased water flow	1.24±0.08	0.27±0.02	0.32±0.02	3.57±0.24	1.50±0.10	0.20±0.01	7.10±0.49
ΔG_{av} , %	+6.4	+5.3	+6.1	+6.3	+6.0	+5.8	+5.2
Summer-autumn flow							
decreased water flow	0.78±0.10	0.18±0.02	0.21±0.03	2.27±0.30	0.96±0.12	0.13±0.02	4.62±0.59
increased water flow	0.90±0.17	0.21±0.04	0.24±0.04	2.66±0.53	1.10±0.20	0.15±0.02	5.40±0.95
ΔG_{av} , %	+15.0	+13.7	+14.5	+17.1	+14.4	+13.9	+16.9
Winter flow							
decreased water flow	0.72±0.07	0.17±0.01	0.19±0.02	2.11±0.19	0.90±0.08	0.12±0.01	4.29±0.39
increased water flow	0.80±0.08	0.19±0.02	0.21±0.02	2.33±0.24	0.99±0.10	0.14±0.01	4.73±0.48
ΔG_{av} , %	+10.8	+9.9	+10.4	+10.6	+10.3	+10.0	+10.4

Table 5. Major ions flux of the Pechora River near the Ust-Tsilma in contrasting phases of decreased and increased water flow (the table shows the long-term average value and standard deviation of sample data $G_{av} \pm \sigma$)

Phases of:	Major ions flux ($G_{cp} \pm \sigma$), million tons per year and seasons						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _{ионов}
Annual flow							
decreased water flow	0.99±0.10	0.25±0.03	0.38±0.04	3.73±0.39	0.66±0.08	0.29±0.03	6.51±0.69
increased water flow	1.11±0.08	0.29±0.02	0.44±0.04	4.17±0.29	0.76±0.08	0.34±0.03	7.33±0.58
$\Delta G_{av}, \%$	12.3	13.0	13.9	11.7	15.2	15.1	12.7
Snowmelt flood flow							
decreased water flow	0.34±0.04	0.09±0.01	0.15±0.02	1.23±0.13	0.29±0.04	0.13±0.02	2.32±0.27
increased water flow	0.38±0.03	0.10±0.01	0.17±0.02	1.36±0.10	0.34±0.04	0.15±0.02	2.59±0.22
$\Delta G_{av}, \%$	11.2	12.1	13.1	10.6	14.7	14.5	11.7
Summer-autumn flow							
decreased water flow	0.38±0.05	0.10±0.01	0.14±0.02	1.44±0.19	0.24±0.05	0.11±0.02	2.49±0.37
increased water flow	0.42±0.06	0.11±0.02	0.16±0.03	1.57±0.21	0.27±0.06	0.12±0.03	2.75±0.42
$\Delta G_{av}, \%$	9.6	10.7	12.0	8.9	14.4	14.1	10.2
Winter flow							
decreased water flow	0.26±0.03	0.06±0.01	0.08±0.01	1.06±0.11	0.12±0.02	0.05±0.01	1.66±0.20
increased water flow	0.33±0.02	0.08±0.01	0.11±0.01	1.29±0.08	0.16±0.02	0.07±0.01	2.08±0.16
The phase of water flow close to its average long-term value	0.30±0.02	0.07±0.01	0.10±0.01	1.20±0.09	0.14±0.02	0.07±0.01	1.92±0.16
$\Delta G_{av}, \%$	23.8	26.6	29.8	22.0	35.6	34.8	25.3

References

1. The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation. Technical Summary [Vtoroy otsenchny doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Tekhnicheskoe rezyume], RF, Moscow, Rosgidromet, 2014, 94 pp. (in Russian). (http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_teh.pdf).
2. S.D. Muravevsky
Rivers and Lakes: Hydrobiology, Flow [Reki i ozera: gidrobiologiya, stok], USSR, Moscow, Geografiz Publ., 1960, 388 pp. (in Russian).
3. Water Resources of Russia and Their Use [Vodnye resursy Rossii i ikh ispolzovanie], Ed. I.A. Shiklomanov, RF, Snt. Petersburg, Publ. SHI, 2008, 600 pp. (in Russian).
4. A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich, I.P. Milyukova, A.V. Kislov, O.A. Anisimov, E.A. Barabanova, E.A. Kashutina, O.O. Borodin
Scenario Assessment of Probable Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia, Part 1: Lena River Basin [Stsenarnaya otsenka veroyatnykh izmeneniy rechnogo stoka v basseynakh krupneyshikh rek Rossii, chast 1: basseyn reki Leny], RF, Moscow, Max Press, 2011, 179 pp. (in Russian).
5. Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies, Eds C.R. Goldman, M. Kumagai, R.D. Robarts, USA, Malden, Wiley-Blackwell, 2013, 496 pp. DOI: 10.1002/9781118470596.
6. M.P. Smirnov
Organic Substances and Mineralization of river waters in Russia, the CIS countries, the Baltic countries [Organicheskie veshchestva i mineralizatsia rechnykh vod Rossii, SNG, Baltii], RF, Rostov-on-Don, NOK Publ., 2015, 358 pp. (in Russian).
7. D.V. Magritsky, N.L. Frolova, V.M. Evstigneev, E.S. Povalishnikova, M.B. Kireeva, O.M. Pakhomova
Polarforschung, 2018, 87(2), 177. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.

8. **A.G. Georgiadi, E.A. Kashutina, I.P. Milyukova**
Polarforschung, 2018, **87**(2), 167.
DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.167.
9. **Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences**, Ser. Springer Environmental Science and Engineering, Eds P.Ya. Groisman, G. Gutman, USA, New York, Springer Dordrecht, 2013, 360 pp.
DOI: 10.1007/978-3-030-4569-8.
10. **D. Yang, D. Kane**
Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, Eds D. Yang, D.L. Kane, CH, Cham, Springer Cham, 2021, 914 pp.
DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.
11. **G.G. Andreyanov**
In Proc. The III All-Union Hydrol. Congr. in 10 Vols, Vol. 2, Runoff Calculations and Forecasts Section [*Trudy III Vsesoyuz. gidrolog. Sezda v 10 tt., t. 2, Sektsiya raschetov i prognozov stoka.*], USSR, Leningrad, 1959, pp. 3–50 (in Russian).
12. **A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich, I.P. Milyukova, E.A. Kashutina, E.A. Barabanova**
Modern and Scenario Changes in River Water Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia, P. 2, Volga and Don Rivers Basins [*Sovremennye i scenariye izmeneniya rechnogo stoka v basseynakh krupneyshikh rek Rossii, ch. 2, Basseyiny rek Volgi i Dona*], RF, Moscow, Max Press, 2014, 214 pp. (in Russian).
13. **R.P. North, D.M. Livingstone, R.E. Hari, O. Köster, P. Niederhauser, R. Kipfer**
Inland Waters, 2013, **3**(3), 341. DOI: 10.5268/IW-3.3.560.
14. **S.N. Rodionov, J. E. Overland**
ICES J. Mar. Sci., 2005, **62**(3), 328.
DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.01.013.
15. **A.G. Georgiadi, I.P. Milyukova, E.A. Kashutina**
Water Resources, 2020, **47**(6), 913. DOI: 10.1134/S0097807820060068.
16. **X. Shi, T. Qin, H. Nie, B. Weng, Sh. He**
Int. J. Environ. Res. Pub. He., 2019, **16**(8), 1469.
DOI: 10.3390/ijerph16081469.
17. **Scientific and Applied Handbook: Long-Term Variability of Water Resources and the Main Characteristics of the Flow of Rivers in the Russian Federation** [*Nauchno-prikladnoy spravochnik: mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiyskoy Federatsii*], RF, Snt. Petersburg, RIAL, Ltd, Publ., 2021, 190 pp. (in Russian).
18. **A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova, E.A. Kashutina, I.P. Milyukova**
Dokl. Earth Sci., 2019, **488**(2), 1211.
DOI: 10.1134/S1028334X19100106.
19. **S. Sharma, P.K. Singh**
Climate, 2017, **5**(1), 18. DOI: 10.3390/cli5010018.
20. **Resources of Surface Waters of the USSR, Vol. 3, Northern Territory** [*Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, t. 3, Severnyy kray*], Eds I.M. Zhila, N.M. Alyushinskaya, USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 663 pp. (in Russian).
21. **O.A. Alekin**
Basic Hydrochemistry [*Osnovy gidrokhimii*], USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 445 pp. (in Russian).
22. **A.M. Nikanorov**
Hydrochemistry: Textbook [*Gidrokhiimiya: Uchebnik*], RF, Snt. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 444 pp. (in Russian).
23. **A.M. Nikanorov, V.A. Bryzgalo**
Rivers of Russia, p. 2, Rivers of the European North and Siberia (Hydrochemistry and Hydroecology) [*Reki Rossii, chast 2, reki Evropeyskogo Severa i Sibiri (gidrokhiimiya i gidroekologiya)*], RF, Rostov-on-Don, NOC, 2010, 200 pp. (in Russian).
24. **Yu.S. Datsenko, L.E. Efimova, M.B. Zaslavskaya, O.M. Pakhomova**
Russian Polar Research [*Rossiyskie polyarnye issledovaniya*], 2016, №1(23), 12 (in Russian). (<http://old.aari.ru/misc/publicat/sources/RPR-23.pdf>).
25. **V.F. Brekhovskikh, Z.V. Volkova, D.V. Lomova**
Meteorologiya i gidrologiya [*Meteorology and Hydrology*], 2004, №10, 87 (in Russian).
26. **The Guidelines for the Chemical Analysis of Land Surface Waters, p. 1** [*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi, ch. 1*], Ed. L.V. Boeva, RF, Rostov-on-Don, NOC, 2009, 1032 pp. (in Russian).
27. **A.N. Pettitt**
J. R. Stat. Soc. C-Appl., 1979, **28**(2), 126. DOI: 10.2307/2346729.
28. **S.N. Rodionov**
Geophys. Res. Lett., 2004, **31**(9), 1.
DOI: 10.1029/2004GL019448.

Лавинная активность в России в условиях изменяющегося климата*

А.С. Турчанинова, С.А. Сократов, Ю.Г. Селиверстов, А.Ю. Комаров

Требования расчета определяемых климатическими условиями показателей лавинной активности на осваиваемых территориях и прогноз их изменения на будущее закреплены законодательством России. Однако требуемые для этого данные существуют далеко не для всех, только сейчас включаемых в промышленное освоение, регионов страны. Ранее на основе данных прямых наблюдений были определены зависимости между климатическими и геоморфологическими показателями и параметрами лавин и лавинной активности, основанные на среднемноголетней максимальной декадной высоте снежного покрова, числе дней со снежным покровом, продолжительности лавиноопасного периода и средней многолетней повторяемости лавин. Авторы включили в разработанную систему зависимостей климатические параметры, представляемые моделью MRI-CGCM3 (RCP 8.5). Это позволило рассчитать показатели лавинной активности на середину и конец XXI века, а также их изменение относительно современных условий. Таким образом была успешно апробирована методология, позволяющая включить нормативно определенные характеристики лавинной активности в анализ и прогнозы региональных изменений климата по любым климатическим сценариям.

Ключевые слова: снежные лавины, лавинная активность, изменение климата, CMIP5, MRI-CGCM3.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и РГО (проекты №№18-05-60080 и 15/2019/РГО-РФФИ).

Введение

Изменения во времени климатических факторов лавинообразования определяют изменения лавинной активности территории, а в совокупности с изменением степени хозяйственной освоенности могут также менять лавинную опасность и лавинный риск, в принятой на сегодня терминологии [1]. При текущем интенсивном освоении новых, прежде всего арктических, регионов России, помимо получения современных расчетных данных в составе результатов инженерных изысканий, включающих в себя, в случае лавиноопасного района, характеристики лавинной активности [2], законодательно требуется прогноз «изменения их значений в процессе строительства и эксплуатации» [3], то есть на многие десятилетия вперед. Очевидно, что суще-

ствующей на сегодня основой таких прогнозов могут рассматриваться лишь сценарные изменения климата. В межправительственных [4] и в отечественных [5] оценочных докладах об изменениях климата лавины включены в число опасных природных процессов, но в терминологии региональных изменений нормативно определенные характеристики лавинной активности не представлены.

Разработка используемых и в настоящее время моделей зависимостей между климатическими и геоморфологическими показателями и параметрами лавин и лавинной ак-



ТУРЧАНИНОВА
Алла Сергеевна
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова



СОКРАТОВ
Сергей Альфредович
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова



СЕЛИВЕРСТОВ
Юрий Германович
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова



КОМАРОВ
Антон Юрьевич
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова

тивности определялась необходимостью освоения горных территорий СССР и отсутствием возможности в полной мере охватить их наблюдениями. Одновременно разрабатывались методики составления карт, позволяющих с высокой долей достоверности относительно регистрируемых климатических условий описывать лавинный режим, в том числе на неисследованных ранее территориях [6–8].

Картографирование лавин

Материалы, собранные на хорошо изученных в лавинном отношении территориях, позволяют установить связи показателей лавинной активности с общими факторами лавинообразования, которые, в свою очередь, переносятся на неизученные территории. Таким образом были разработаны методы определения показателей лавинной активности по доступным или легко определяемым характеристикам климата (температура, осадки, продолжительность залегания снежного покрова) и рельефа (глубина расчленения) [9–11]. Другим имеющимся подходом является определение «лавиного климата» [12–14], для каждого типа которого на основании зарегистрированных лавин определяются средние значения приводящих к ним факторов лавинообразования (температура, осадки, высота и плотность снежного покрова). При всей схожести этих подходов только первый из них не требует значительного массива зарегистрированных лавин на конкретной анализируемой территории, поэтому он и использован в настоящем исследовании.

Среднемасштабные карты лавинной активности могут быть использованы для выявления общих закономерностей пространственно-временного распространения лавин. С практической точки зрения среднемасштабные карты необходимы для выявления районов, в пределах которых проектированию и освоению

территории должны предшествовать снеголавинные изыскания [15]. Такие карты не должны заменять крупномасштабные карты для конкретных объектов инфраструктуры, однако могут дать представление о прошлых, текущих или прогнозируемых изменениях.

Методика и материалы

Для расчета изменений климатических параметров и связанных с ними показателей лавинной активности из ансамбля CMIP 5 сценария RCP 8.5 МГЭИК была выбрана модель MRI-CGCM3 эксперимент r11p1 [16]. Основанием для такого выбора послужили сведения о том, что эту модель отличает наиболее выраженная положительная корреляция значений атмосферного давления в пределах Сибирского антициклона, полученных в результате реанализа, а также она дает наиболее близкие к реальным значения зимних температур [17, 18]. Кроме этого, модель имеет достаточно густую сеть расчетных значений — размер ячейки в пределах горных районов Российской Федерации изменяется от $1.122^\circ \times 1.125^\circ$ до $1.118^\circ \times 1.125^\circ$, что в условиях отсутствия региональных моделей изменения климата для горных районов России позволяет оценивать изменения на относительно небольших по площади территориях. Последний период, по которому выполнялся реанализ, — 1991–2000 гг. Он был принят в качестве «современного», и по отношению к нему выполнялись расчеты изменений искомых параметров в будущем. Расчеты выполнены на середину (2041–2050) и конец (2091–2100) XXI века.

На указанные периоды для узлов сетки (рис. 1) рассмотренной климатической модели (в пределах границ лавиноактивных и потенциально лавиноактивных территорий [19]) были рассчитаны средние значения требуемых климатических параметров [20]: температуры воздуха января, суммы значений температуры воздуха за октябрь – январь – апрель, суммы осадков холодного периода (ноябрь – март).

По зависимостям были определены средние значения: многолетней максимальной декадной высоты снежного покрова, числа дней со снежным покровом, продолжительности лавиноопасного периода и повторяемости лавин для узлов сетки рассмотренной климатической модели в указанных выше временных промежутках.

По полученным данным с использованием инструментов ArcGIS (Spatial Analyst) были построены растры значений рассчитанных показателей и соответствующие им карты. По разности значений параметров за разные периоды с использованием ArcGIS также были построены поверхности, характеризующие их изменения.

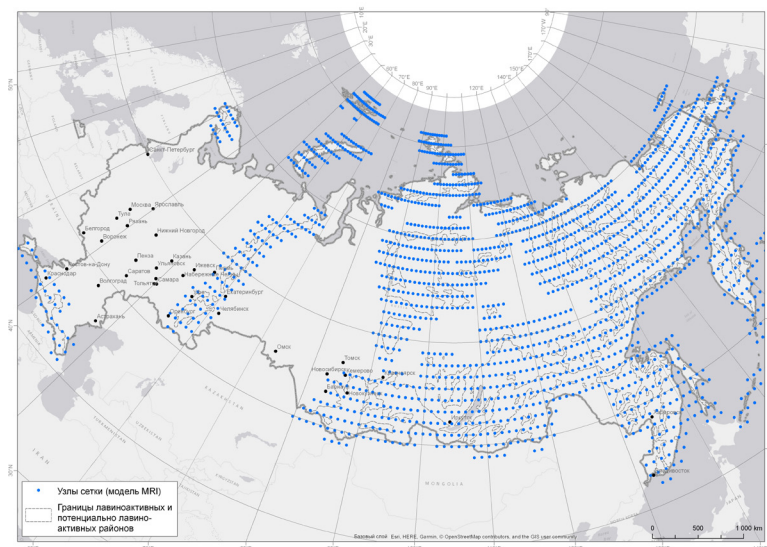


Рис. 1. Сеть расчетных значений климатической модели MRI-CGCM3 из ансамбля CMIP 5 сценария RCP 8.5 МГЭИК (IPCC).

Определение показателей лавинной активности

В настоящей работе использованы зависимости показателей лавинной активности от лавиноидентификационных характеристик климата [20]. Они были построены по фактически данным на основе обобщения материалов наблюдений за лавинами снеголавинных станций Госкомгидромета.

Среднемноголетняя максимальная декадная высота снежного покрова определяется в зависимости от температуры воздуха января и суммы осадков холодного периода (ноябрь – март), установленной и проверенной по данным 700 горных и равнинных метеостанций бывшего СССР, исключая те из них, где метелевый перенос снега оказывает существенное влияние на точность измерения осадков [10]. Коэффициент корреляции данных по отдельным метеостанциям и соответствующих кривых оказался не менее 0.8–0.9. На основе сопоставления карт, составленных этим методом, и контрольных карт из региональных атласов [21] принято считать рассмотренный метод приемлемым для построения мелкомасштабных карт среднемноголетней декадной высоты снежного покрова. Его применение ограничивается территориями, для которых имеются карты или данные о сумме осадков холодного периода, точность — преимущественно точностью последних [20].

Число дней со снежным покровом определяется в зависимости от суммы средних месячных значений температуры воздуха за октябрь–январь–апрель и суммы осадков холодного периода (ноябрь – март). Эта зависимость была построена по данным более 800 метеостанций СССР и проверена путем сравнения определенных по графикам и фактических величин числа дней со снежным покровом по данным 228

метеорологических станций, расположенных в горах Сибири, Кавказа и Средней Азии на высоте более 1000 м [11]. Проверка показала, что для Сибири коэффициент корреляции снятых с графика и фактических величин составил 0.8, для других районов он близок к 0.9 [20].

Продолжительность лавиноопасного периода определяется среднемноголетней декадной высотой снежного покрова и числом дней со снежным покровом. Величина продолжительности лавиноопасного периода, естественно, меньше числа дней со снежным покровом. Для определения разности между ними были проанализированы сведения о типичном ходе изменений высоты снежного покрова в течение зимы [11]. При этом установлено, что разница закономерно изменяется в зависимости от среднемноголетней декадной высоты снежного покрова.

Средняя многолетняя повторяемость лавин определялась в зависимости от среднемноголетней максимальной декадной высоты снежного покрова и средней температуры самого холодного месяца, предложенной Л.А. Канаевым и К.Л. Абдушешвили [20]. Учитывались только крупные лавины, достигающие дна долины. Если в зависимость включать и мелкие лавины, останавливающиеся на склоне, общее число лавин стало бы в 2–3 раза больше [20].

Полученные результаты

На основе полученных данных и рассмотренных выше зависимостей для трех выбранных периодов были определены значения среднемноголетней максимальной декадной высоты снежного покрова, число дней со снежным покровом, продолжительность лавиноопасного периода и повторяемости лавин. В результате были построены карты среднемноголетней максимальной декадной высоты снежного покрова (рис. 2) и продолжительности лавиноопасного периода (рис. 3) в разные временные

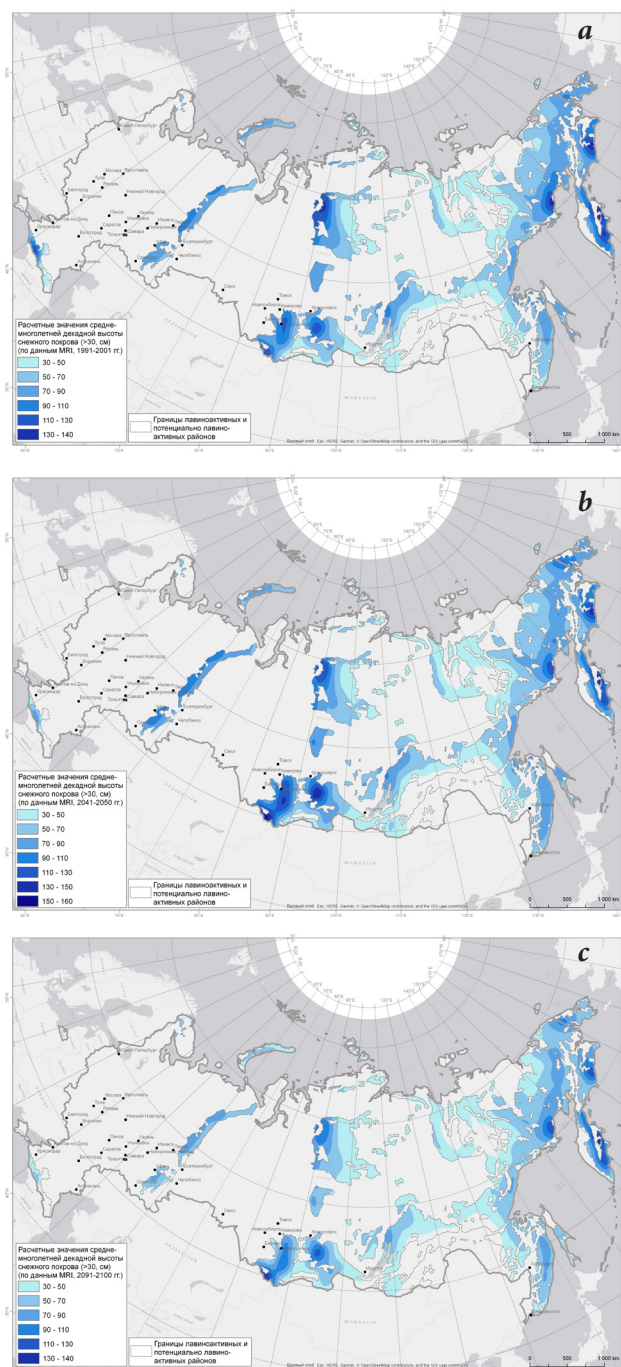


Рис. 2. Среднегодовая максимальная расчетная декадная высота снежного покрова: а — в «современный» период; б — в середине XXI века; с — в конце XXI века.

периоды, а также карты, иллюстрирующие прогнозируемые в рамках рассмотренного сценария изменения в качественных (рис. 4) и количественных (рис. 5-6) показателях.

Выводы

Установлено, что при реализации рассмотренного сценария к середине XXI века, несмотря на повсеместный

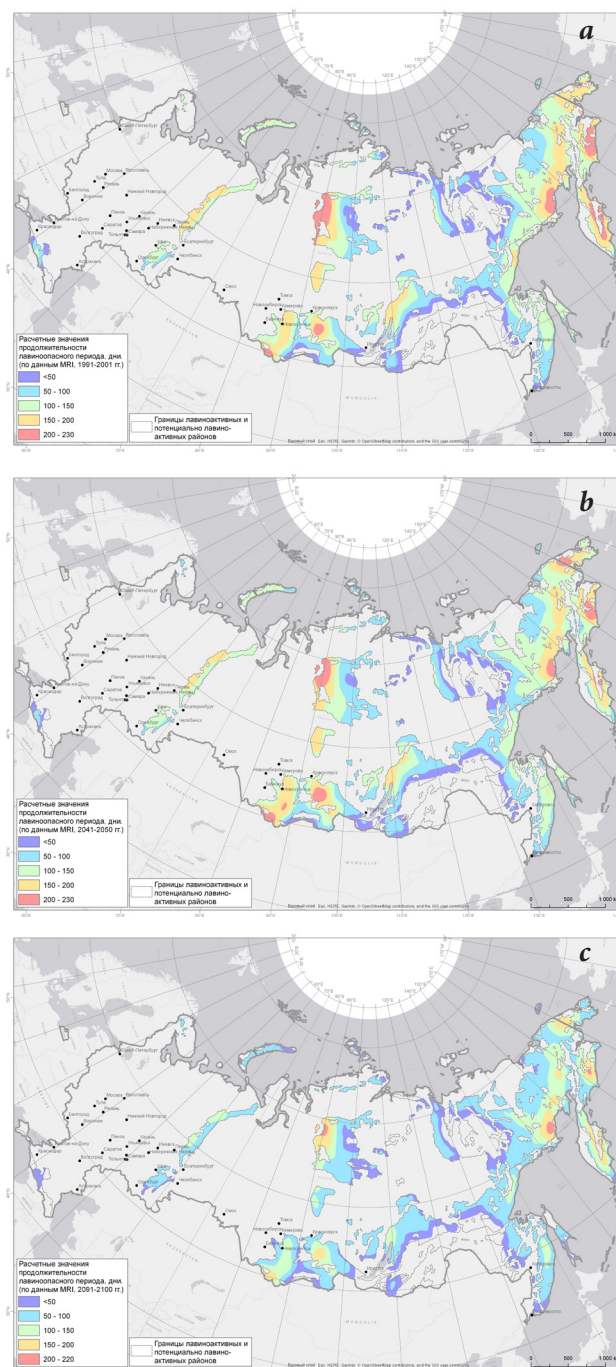


Рис. 3. Расчетная продолжительность лавиноопасного периода: а — в «современный» период; б — в середине XXI века; с — в конце XXI века.

рост температуры воздуха января, на большей части Урала, Алтае, Саянах, Сихотэ-Алине, Сахалине, во внутриконтинентальных районах северо-восточной части России происходит увеличение среднегодовой максимальной декадной высоты снежного покрова. Увеличение высоты снежного покрова связано с увеличением количества осадков, выпадающих в зимний период (ноябрь – март) на большей части территории Российской Федерации. Изменение отражает в целом существующие тренды изменения высоты снежного покрова, отмечаемые в ежегодных

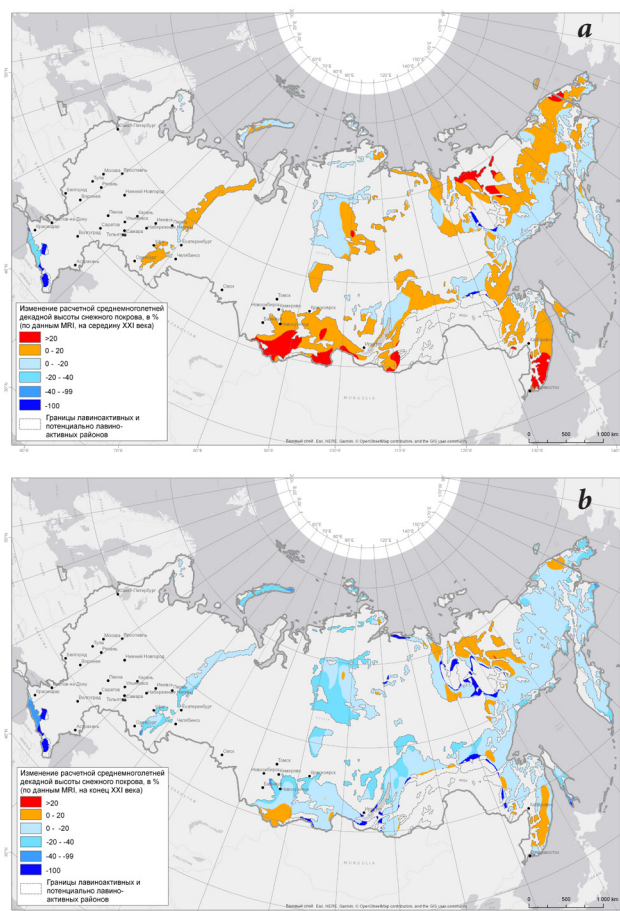


Рис. 4. Изменение (%) расчетной среднесуточной максимальной декадной высоты снежного покрова относительно «современного» периода: а – в середине XXI века; б – в конце XXI века.

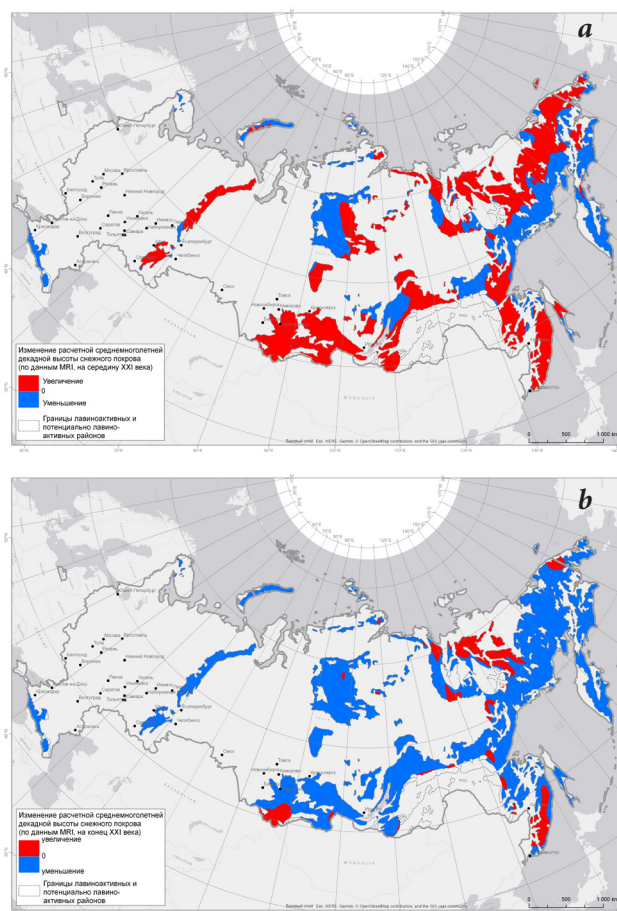


Рис. 5. Изменение расчетной среднесуточной максимальной декадной высоты снежного покрова относительно «современного» периода: а – в середине XXI века; б – в конце XXI века.

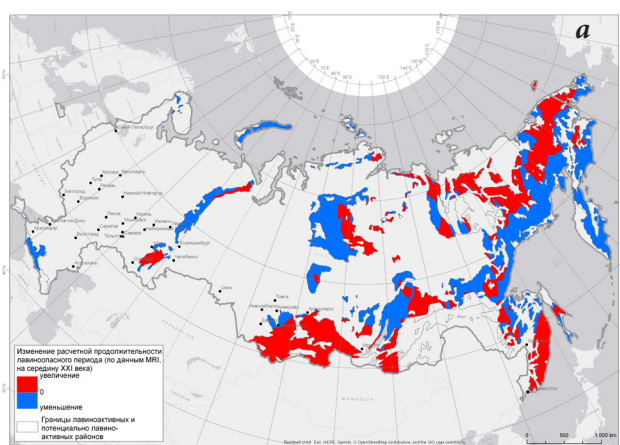


Рис. 6. Изменение расчетной продолжительности лавиноопасного периода относительно «современного» периода: а – в середине XXI века; б – в конце XXI века.

отчетах Росгидромета. И только на Кавказе, в горах прибрежной части северо-востока страны, на западе плато Путорана к середине XXI века должно произойти уменьшение высоты снежного покрова.

К концу XXI века глобальное повышение температуры, прогнозируемое выбранной моделью и сценарием, всё же приведет к уменьшению высоты снежного покрова на большей части территории страны. Как следствие увеличения высоты снежного

покрова, к середине XXI века ожидается увеличение продолжительности лавиноопасного периода на Южном Урале, Алтае, Приморье, в горах внутриконтинентальной части северо-востока России. В указанных районах возможно увеличение лавинной опасности. К концу XXI века уменьшение продолжительности ла-

виноопасного периода происходит почти повсеместно.

Использование других моделей или их ансамбля, как и других сценариев, несомненно, представит другие количественные результаты.

Однако полученные тренды, различные для разных регионов страны, должны остаться такими же, а предложенная методика позволяет включить нормативно определенные характеристики лавинной активности в анализ и прогнозы региональных изменений климата.

Литература

1. М.А. Викулина, А.Л. Шныпарков
Материалы гляциологических исследований, 2008, №105, 12.
2. СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования», РФ, Москва, Минстрой России, 2018, 58 с.
3. Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (<https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1241>).
4. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, UK, Cambridge, and USA, NY, New York, Cambridge University Press, 2022, 3056 pp. DOI: 10.1017/9781009325844.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, т. 1, основной, РФ, Москва, Росгидромет, 2014, 1008 с.
6. Г.К. Тушинский
Защита автомобильных дорог от лавин, СССР, Москва, Авто-транспиздат, 1960, 152 с.
7. К.С. Лосев
Лавины СССР (распространение, районирование, возможности прогноза), СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1966, 129 с.
8. Т.Г. Глазовская, С.М. Мягков, В.Ф. Околов, Е.С. Трошкина
В Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, т. II, кн. 1, под ред. В.М. Котлякова, РФ, Москва, Институт географии РАН, 1997, с. 158–166.
9. Т.Г. Глазовская, С.М. Мягков, В.Ф. Околов
Материалы гляциологических исследований, 1978, №34, 50.
10. В.Ф. Околов
В Сб. Картографирование лавиноопасных территорий в среднем масштабе (деп. ВИНТИ, №1625-В86), СССР, Москва, ВИНТИ, 1986, с. 111–121.
11. В.Ф. Околов
В Сб. Картографирование лавиноопасных территорий в среднем масштабе (деп. ВИНТИ, №1625-В86), СССР, Москва, ВИНТИ, 1986, с. 121–126.
12. R.L. Armstrong, B.R. Armstrong
B Avalanche Formation, Movement and Effects: Proc. Davos Symposium, Sept. 1986, IAHS "Red Books" Publ. no. 162, Eds B. Salm, H. Gubler, UK, Oxon, Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, 1987, pp. 281–294.
13. C.J. Mock, K.W. Birkeland
Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, **81**(10), 2367. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2367:SACOTW>2.3.CO;2.
14. B. Shandro, P. Haegeli
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2018, **18**(4), 1141. DOI: 10.5194/nhess-18-1141-2018.
15. СП 115.13330.2016 «СНиП 22-01-95 Геофизика опасных природных воздействий», РФ, Москва, Минстрой России, 2016, 40 с.
16. S. Yukimoto, Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami et al.
J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II, 2012, **90A**, 23. DOI: 10.2151/jmsj.2012-A02.
17. Ch. Miao, Q. Duan, Q. Sun, Y. Huang, D. Kong, T. Yang, A. Ye, Zh. Di, G. Wei
Environ. Res. Lett., 2014, **9**(5), 055007. DOI: 10.1088/1748-9326/9/5/055007.
18. F. Li, Y.-Q. Gao
Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2015, **8**(4), 179. DOI: 10.3878/AOSL20140101.
19. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, т. I, под ред. В.М. Котлякова, РФ, Москва, Институт географии РАН, ИПП «Картография», 1997, 392 л.к.
20. География лавин, под ред. С.М. Мягкова, Л.А. Канаева, РФ, Москва, МГУ, 1992, 332 с.
21. Т.Г. Глазовская, С.М. Мягков
Материалы гляциологических исследований, 1978, №34, 46.

English

Avalanche Activity in Russia in the Changing Climate*

Alla S. Turchaninova

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
alla_wave87@mail.ru

Sergey A. Sokratov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
sokratov@geogr.msu.ru

Yuri G. Seliverstov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
yus5@yandex.ru

Anton Yu. Komarov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
ankom9@gmail.com

Abstract

The requirements for the calculation of indicators of avalanche activity determined by climatic conditions in the territories under developing, as well as prognosis of their changes in the future are enshrined in Russian Federation legislation. However, the data required for this do not exist for all the regions of the country, especially those, that are only now included in the industrial exploration. The dependences between the climatic and the geomorphological indicators and parameters of avalanches and avalanche activity are developed earlier on the basis of data from direct observations. The indicators are based on the average annual maximum ten-day snow cover height, the number of days with snow cover, the duration of the avalanche period and the average long-term frequency of avalanches. The climatic parameters presented by model MRI-CGCM3 (RCP 8.5) were incorporated into these dependences system. This made possible to estimate the indicators of avalanche activity for the middle and for the end of the 21st century. Also, their changes relative to the present conditions were assessed. Thus, a methodology was successfully tested that allows to include normatively defined characteristics of avalanche activity in the analysis and forecasts of regional climate changes for any climate scenarios.

Keywords: snow avalanche, avalanche activity, climate change, CMIP5, MRI-CGCM3.

**The work was financially supported by RFBR and RGS (projects 18-05-60080 and 15/2019/RGS-RFBR).*

Images & Tables

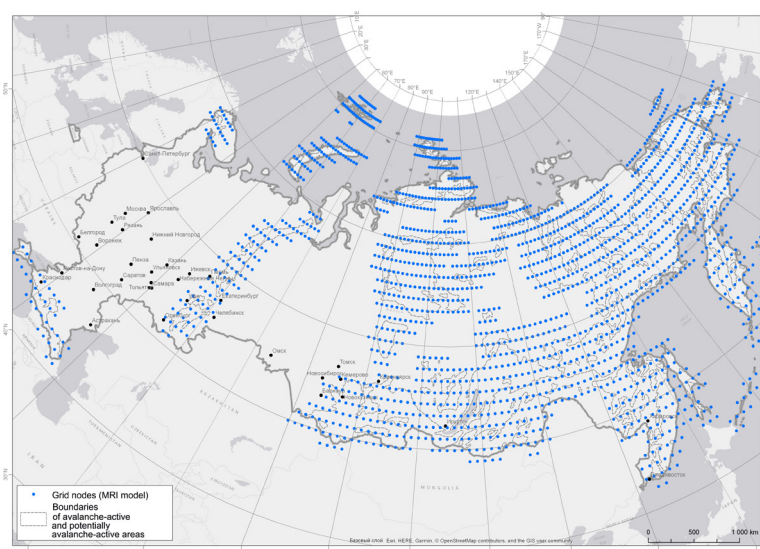


Fig. 1. MRI-CGCM3 Climate Model Design Network from CMIP 5 Ensemble of IPCC RCP 8.5 Scenario.

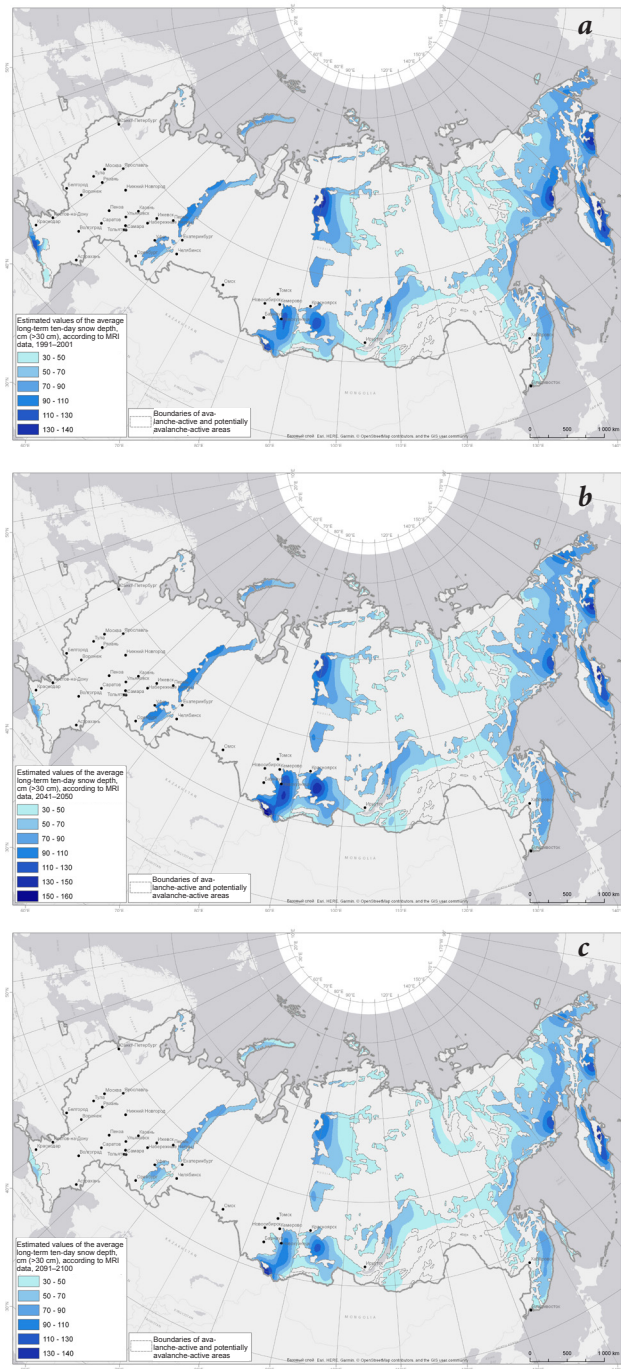


Fig. 2. Average long-term calculated maximum ten-day snow cover height: a – in the «present» period; b – in the middle of the 21st century; c – at the end of the 21st century.

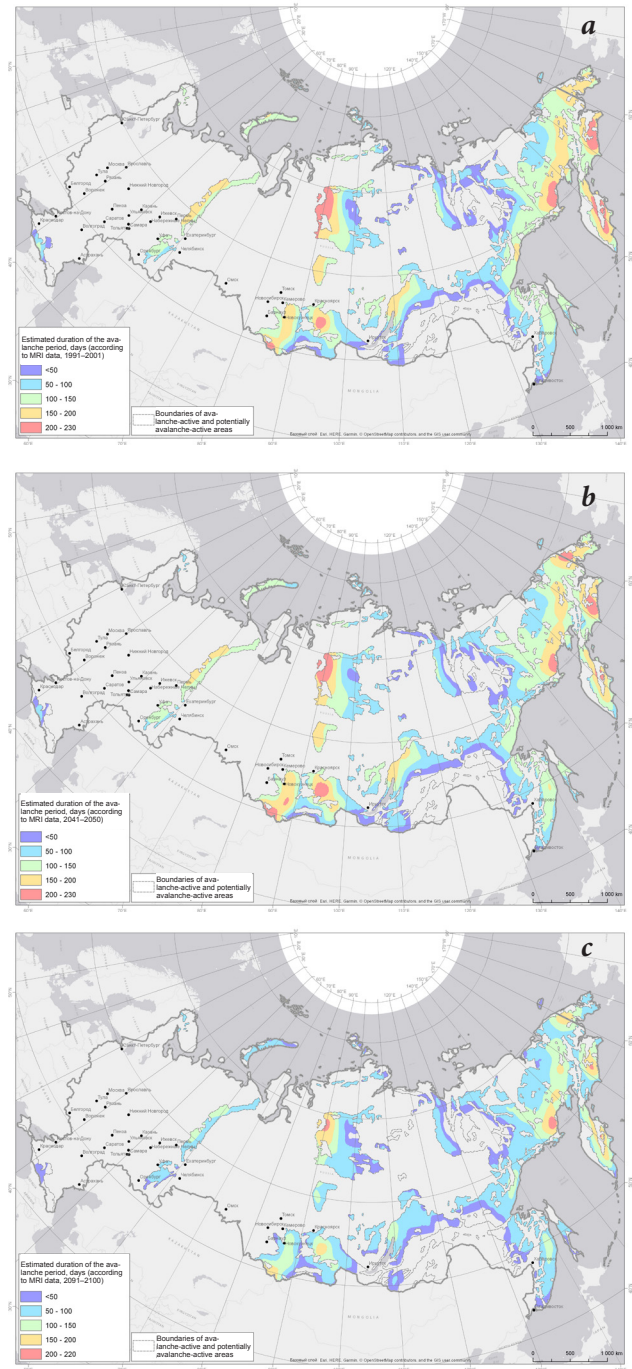


Fig. 3. Estimated duration of the avalanche period: a – in the «present» period; b – in the middle of the 21st century; c – at the end of the 21st century.

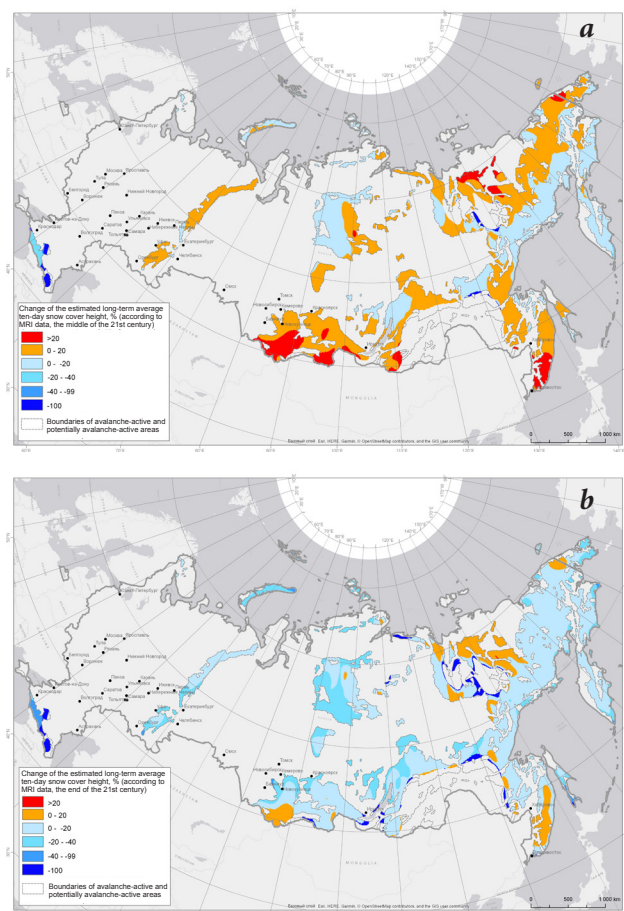


Fig. 4. Change (%) of the estimated long-term average maximum ten-day snow cover height relative to the «present» period: a – in the middle of the 21st century; b – at the end of the 21st century.

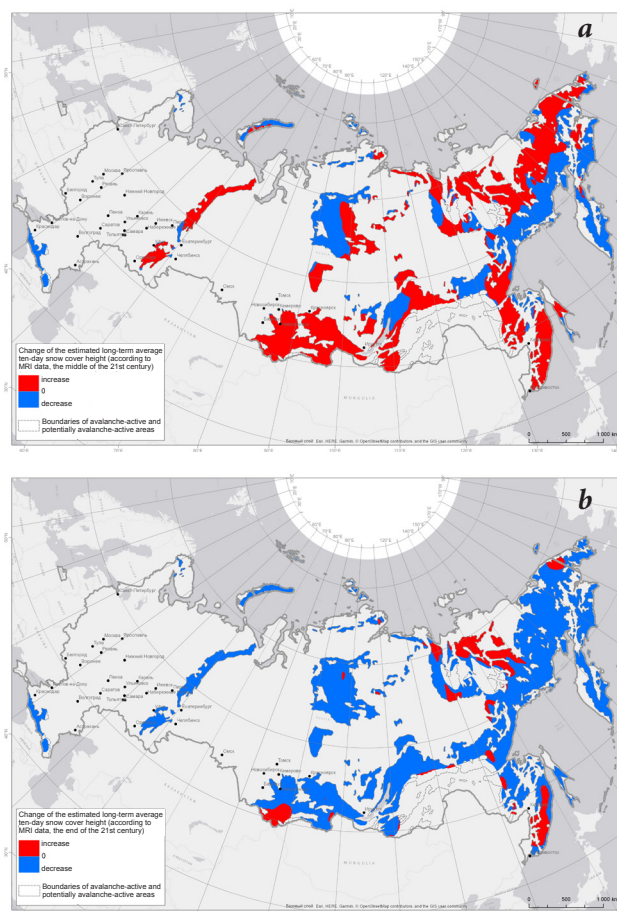


Fig. 5. Changes in the estimated long-term average maximum ten-day snow cover height relative to the «present» period: a – in the middle of the 21st century; b – at the end of the 21st century.

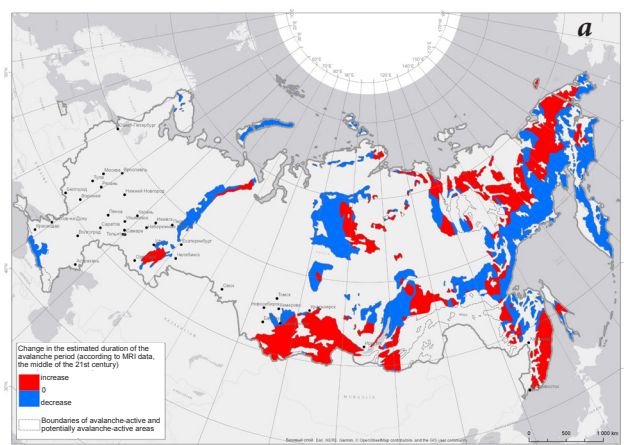


Fig. 6. Change in the estimated duration of the avalanche period relative to the «present» period: a – to the middle of the 21st century; b – at the end of the 21st century.

References

1. **M.A. Vikulina, A.L. Shnyarkov**
Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 2008, №105, 12 (in Russian).
2. **Building Codes 428.1325800.2018** "Engineering Surveys for Construction in Avalanche Areas. General Requirements" [SP 428.1325800.2018 "Inzhenernye izyskaniya dlya stroitelstva v lavinoopasnykh rayonakh. Obshchie trebovaniya"], RF, Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2018, 58 pp. (in Russian).
3. **Federal Law №384-FZ, Dec. 30, 2009 (as amended on Jul. 2, 2013)** "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" [Federalny zakon ot 30.12.2009 №384-FZ (red. ot 02.07.2013) «Tekhnichesky reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy»] (in Russian). (<https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1241>).
4. **IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, UK, Cambridge, and USA, NY, New York, Cambridge University Press, 2022, 3056 pp.
DOI: 10.1017/9781009325844.
5. **The 2nd Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation, Vol. 1, Keynote [Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii, t. 1, osnovnoy]**, RF, Moscow, Publ. Rosgidromet, 2014, 1008 pp. (in Russian).
6. **G.K. Tushinsky**
Protection of Highways from Avalanches [Zashchita avtomobilnykh dorog ot lavin], USSR, Moscow, Avtotransizdat, 1960, 152 pp. (in Russian).
7. **K.S. Losev**
Avalanches of the USSR (Distribution, Zoning, Forecasting Capabilities) [Laviny SSSR (rasprostraneniye, rayonirovaniye, vozmozhnosti prognoza)], USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 129 pp. (in Russian).
8. **T.G. Glazovskaya, S.M. Myagkov, V.F. Okolov, E.S. Troshkina**
In World Atlas of Snow and Ice Resources, Vol. II, Ed. V.M. Kotlyakov, RF, Moscow, Institute of Geography RAS, 1997, pp. 125–132.
9. **T.G. Glazovskaya, S.M. Myagkov, V.F. Okolov**
Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 1978, №34, 50 (in Russian).
10. **V.F. Okolov**
In Coll. Art. "Mapping of Avalanche-Prone Areas on a Medium Scale" [Kartografirovaniye lavinoopasnykh territoriy v srednem masshtabe], Dep. VINITI №1625-V86, USSR, Moscow, VINITI, 1986, pp. 111–121 (in Russian).
11. **V.F. Okolov**
In Coll. Art. "Mapping of Avalanche-Prone Areas on a Medium Scale" [Kartografirovaniye lavinoopasnykh territoriy v srednem masshtabe], Dep. VINITI №1625-V86, USSR, Moscow, VINITI, 1986, pp. 121–126 (in Russian).
12. **R.L. Armstrong, B.R. Armstrong**
In Avalanche Formation, Movement and Effects: Proc. Davoce Symposium, Sept. 1986, IAHS "Red Books" Publ. no. 162, Eds B. Salm, H. Gubler, UK, Oxon, Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, 1987, pp. 281–294.
13. **C.J. Mock, K.W. Birkeland**
Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, **81**(10), 2367.
DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2367:SACOTW>2.3.CO;2.
14. **B. Shandro, P. Haegeli**
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2018, **18**(4), 1141.
DOI: 10.5194/nhess-18-1141-2018.
15. **Building Codes 115.13330.2016 "SNR 22-01-95 Geophysics of Natural Hazards" [SP 115.13330.2016 "SNiP 22-01-95 Geofizika opasnykh prirodnnykh vozdeystviy"]**, RF, Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016, 40 pp. (in Russian).
16. **S. Yukimoto, Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami et al.**
J. Meteorolog. Soc. Jpn. Ser. II, 2012, **90A**, 23.
DOI: 10.2151/jmsj.2012-A02.
17. **Ch. Miao, Q. Duan, Q. Sun, Y. Huang, D. Kong, T. Yang, A. Ye, Zh. Di, G. Wei**
Environ. Res. Lett., 2014, **9**(5), 055007.
DOI: 10.1088/1748-9326/9/5/055007.
18. **F. Li, Y.-Q. Gao**
Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2015, **8**(4), 179.
DOI: 10.3878/AOSL20140101.
19. **World Atlas of Snow and Ice Resources, Vol. I [Atlas snezhnoledovykh resursov mira, t. I]**, Ed. V.M. Kotlyakov, RF, Moscow, Publ. Institute of Geography RAS, 1997, 392 maps (in Russian).
20. **Avalanche Geography [Geografiya lavin]**, Eds S.M. Myagkov, L.A. Kanaev, RF, Moscow, MSU Publ., 1992, 332 pp. (in Russian).
21. **T.G. Glazovskaya, S.M. Myagkov**
Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 1978, №34, 46 (in Russian).

Явление отрицательной вязкости при вытягивании синоптических вихрей океана баротропными течениями*

Д.А. Арутюнян

Ансамбль синоптических океанских вихрей, который находится под воздействием фоновых течений, может быть представлен как квазидвумерная мезомасштабная турбулентность. Эволюция вихрей в ансамбле может происходить по нескольким сценариям: 1) первоначальное слияние одноименных близко расположенных вихрей; 2) периодическая или квазипериодическая эволюция горизонтальных размеров с ограниченным их изменением; 3) неограниченное вытягивание вихрей в горизонтальной плоскости. Представленная работа нацелена на демонстрацию возможности проявления отрицательной вязкости в акваториях Мирового океана на стадии неограниченного вытягивания мезомасштабных вихревых структур горизонтальными неоднородными течениями. Причина проявления отрицательной вязкости в такой системе связана с потерей энергии вытягивающихся вихрей и перераспределение ее в фоновые течения.

Ключевые слова: эллипсоидальный вихрь, полная энергия вихря, отрицательная вязкость, прямой и обратный энергетические каскады.

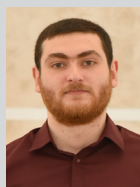
*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-05-07073).

Введение

В 1971 г. в СССР была опубликована монография Виктора Старра «Физика явлений с отрицательной вязкостью», привлекая внимание исследователей к этому весьма интересному явлению во многих разделах физики. Автор на доступном уровне объяснил причину значительного уменьшения турбулентного трения в ряде физических процессов. В нашем случае для океана и атмосферы суть уменьшения трения сводилась к следующему. В статистической гидродинамике удастся отдельно описать эволюцию кинетической энергии осредненного и турбулентного (пульсационного) движений среды. Каждый вид движения затухает из-за наличия вязкости. Причем в осредненном движении энергия уменьшается за счет турбулентного трения, которое значительно превышает молекулярное трение, а в пульсационном – за счет молекулярной вязкости. Кроме того, эти виды движения обмениваются энергией между собой. В какую сторону происходит переток энергии – от осредненного течения в пульсационное или наоборот – заранее не ясно.

Более привычной является ситуация перераспределения энергии от осредненного движения в пульсационное (турбулентное). Такой тип взаимодействия понятен в случае неустойчивости осредненного течения, при котором в течении образуются вихри мень-

шего характерного размера, чем размер течений. Созданные вихри сами могут быть неустойчивыми и распадаются на более мелкие вихри. При этом энергия перераспределяется с больших масштабов на малые. Такое перераспределение энергии называется прямым энергетическим каскадом. Однако возможен и противоположный процесс – передача энергии от вихрей в осредненное течение, то есть перераспределение энергии от малых масштабов к большим. Такой процесс происходит с обратным энергетическим каскадом или, если использовать первоначальное название (например, как у В. Старра), то это явление с отрицательной вязкостью. Такие процессы не запрещены гидродинамикой, но малоизучены. Явления с отрицательной вязкостью кажутся менее естественными, но в природе встречаются. Это знаменитые пыльные бури в пустынях, пыльные бури на Марсе, интенсивные течения со взвешенными частицами в реках, например, Янцзы.



АРУТЮНЯН
Давид Арменович
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

В. Старр в качестве зон Мирового океана с заметными явлениями с отрицательной вязкостью предлагает акватории мощных течений, например, Гольфстрим. Что касается океанов, то надежные доказательства существования здесь явлений с отрицательной вязкостью находятся под большим вопросом. Целью данной работы является с позиции теории предложить океанский гидродинамический процесс, который должен приводить к явлению отрицательной вязкости.

Поясним, как влияет наличие прямого или обратного энергетического каскада течений на эффективную турбулентную вязкость среды. Для этого вернемся к вопросу об эволюции энергии осредненного и пульсационного движений. В случае прямого энергетического каскада осредненное течение теряет энергию как за счет турбулентной вязкости, так и за счет перераспределения энергии от течения на пульсационные движения (турбулентность). Обе потери осредненного движения одного знака, и их сумму можно представить как чисто вязкостные потери, но с большим эффективным коэффициентом турбулентной вязкости. При этом пульсационные движения получают дополнительную энергию и становятся более интенсивными. В случае обратного энергетического каскада энергия осредненного движения по-прежнему уменьшается за счет трения, но пополняется из энергии пульсационного движения. В результате потери энергии осредненным движением уменьшаются, возможно, значительно. Если, как и ранее, представить суммарную потерю энергии как результат некоего эффективного трения, то в этом трении коэффициент вязкости должен быть уменьшен по сравнению с исходным коэффициентом турбулентной вязкости. При этом осредненное движение должно стать более интенсивным, а пульсационное – менее значимым. В экстремальных случаях эффект уменьшения трения может

быть весьма значительным. При реализации обратного энергетического каскада в среде должны наблюдаться интенсивные течения с более слабой турбулизацией, что, собственно, и наблюдается в пыльных бурях и упомянутых ранее явлениях интенсификации средних течений и ветров.

До сих пор проблема обратного энергетического каскада в основном изучалась в задачах численного моделирования океанских и атмосферных течений. В данной работе будет предложено вполне конкретное гидродинамическое явление, допускающее аналитическое решение и приводящее к явлению отрицательной вязкости.

Из теории эллипсоидальных вихрей [1] известно, что вихри во внешнем баротропном течении вытягиваются в горизонтальном направлении. При таком вытягивании эффективное сечение ядра вихря (площадь эллипса) не меняется. Объем вихря также сохраняется. При вытягивании вихрь теряет часть своей энергии [2]. Теряемая вихрем энергия возвращается в течение. То есть процесс потери энергии вихрем одновременно приводит к перераспределению энергии от малых горизонтальных масштабов (масштаб вихря) на большие масштабы (горизонтальный масштаб течения), что соответствует обратному энергетическому каскаду. Первоначально такие явления назывались явления с отрицательной вязкостью [3].

Эволюция энергии вихря во внешнем течении

В работе [1] было найдено выражение для полной механической энергии вихря

$$E = \frac{3}{40\pi} \rho V^2 \sigma^2 \frac{A}{c} \int_0^\infty \frac{ds}{\sqrt{(s^2 + vs + 1)(A^2 + s)}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды; V – объем вихря (эллипсоида); σ – потенциальная завихренность; a, b, c – полуоси эллипсоида; $v = \frac{a}{b} + \frac{b}{a}$ – горизонтальный параметр; $A = \frac{N}{f} \frac{c}{\sqrt{ab}}$ – вертикальный параметр; N – частота Вайсяля – Брента; f – параметр Кориолиса.

У вихря при действии на него баротропного течения меняется только параметр горизонтальной вытянутости v , а все остальные параметры сохраняются. Следовательно, удобно исследовать энергию вихря как функцию одной переменной $E(v)$. Скорость изменения энергии вихря при вытягивании есть

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE}{dv} \cdot \frac{dv}{dt},$$

$$\frac{dE}{dv} = -\frac{1}{2} E' \int_0^\infty \frac{s ds}{(s^2 + vs + 1) \sqrt{(s^2 + vs + 1)(A^2 + s)}}, \quad (2)$$

$$E' = \frac{3}{40\pi} \rho V^2 \sigma^2 \frac{A}{c} = const.$$

Потеря энергии вихря при вытягивании как проявление эффекта отрицательной вязкости

Для исследования эволюции энергии необходимо вычислить знак производной $\frac{dE}{dt}$. Очевидно, что потеря энергии вихря произойдет при $\frac{dE}{dt} < 0$. Горизонтальный параметр $v = a/b + b/a$ постоянно растет с вытягиванием, то есть $\frac{dv}{dt} > 0$. Остается выяснить знак $\frac{dE}{dv}$. Рассмотрим изменение энергии вихря $\frac{dE}{dv}$ при его вытягивании до 100 раз при нескольких параметрах $A=0.1, 1, 10$ (рис. 1).

Как видим, производная энергии вихря по параметру v везде отрицательна $\frac{dE}{dv} < 0$. Это говорит о том, что с вытягиванием вихрь лишь теряет энергию. Возникает вопрос: куда уходит теряемая энергия? В системе «течение—вихрь» энергия может «путешествовать» только между ними, то есть либо от течения передаваться вихрю, либо наоборот – от вихря перейти обратно в течение. Формула (2) и рисунок 1 показывают, что при вытягивании часть энергии вихря возвращается обратно в течение. Вышесказанное справедливо для взаимодействия одного вихря с фоновым течением. При рассмотрении ансамбля вихрей в том же течении очевидно, что каждый из вихрей будет взаимодействовать с течением и с другими вихрями. При этом возникнет новый эффект – слияние

близко расположенных вихрей. Эффекты взаимодействия вихрей друг с другом на несколько больших расстояниях, где уже не реализуется слияние, схожи с эффектами проявления обычного взаимодействия вихрей с течениями. Здесь возможен вариант квазипериодического поведения параметров вихря во времени – режимы вращения или колебания. Кроме того, возможен и режим неограниченного вытягивания одного вихря другим. Суммируя сказанное, делаем физический вывод – в поведении ансамбля вихрей на фоне неоднородного баротропного течения следует ожидать:

- 1) на начальном этапе за короткое время произойдет слияние близкорасположенных вихрей;
- 2) затем часть вихрей будут существовать в периодическом или квазипериодическом режиме, что в среднем не увеличит и не уменьшит их энергию;
- 3) наконец, часть вихрей вытянется в нить, что приведет к потере их энергии.

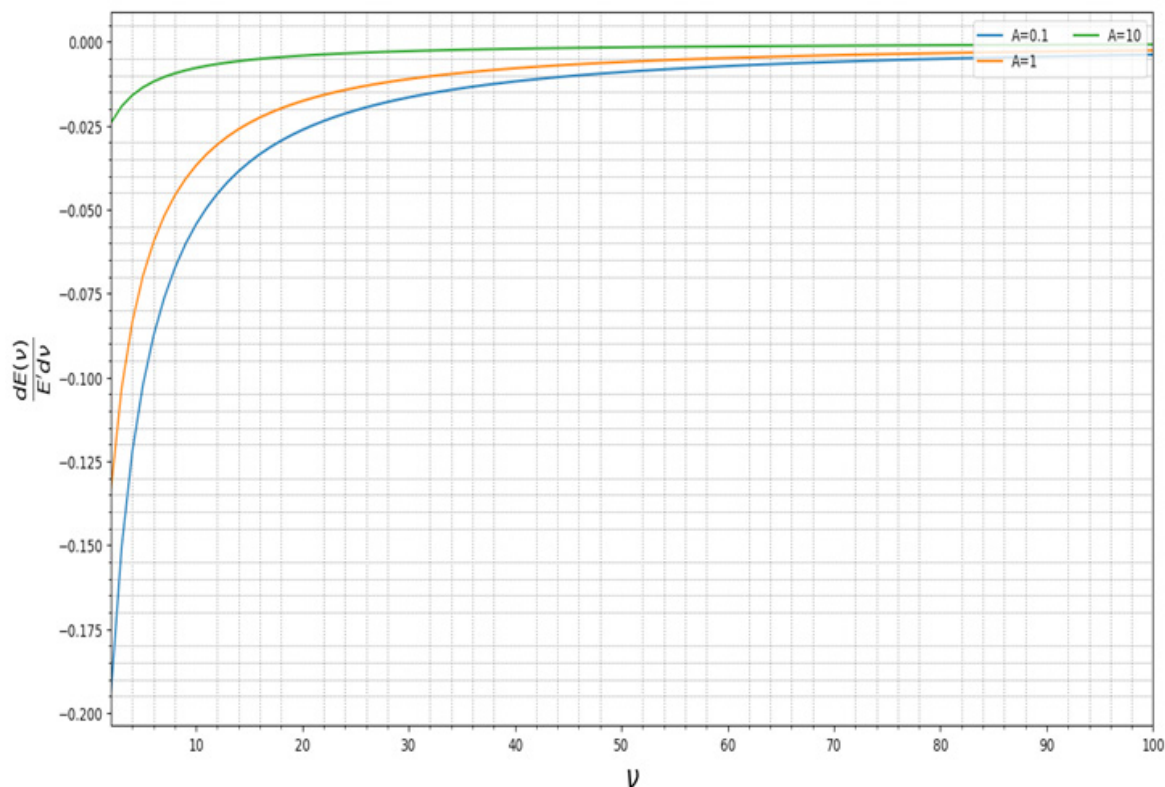


Рис. 1. График зависимости изменения относительной энергии $(\frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dv})$ вихря по мере увеличения параметра v для различных параметров $A=0.1, 1, 10$.

Вытягивающиеся вихри ответственны за проявление свойств отрицательной вязкости. Таким образом, на длительном промежутке времени (кроме самого начального этапа развития) в ансамбле вихрей на фоне неоднородного течения следует ожидать проявление свойств отрицательной вязкости. Для наглядности представим блок-схему «путешествия» энергии.

Рис. 2 демонстрирует качественную картину передачи энергии от явлений одного масштаба к явлениям другого масштаба. Так, крупномасштабное течение с горизонтальным размером L , заметно превышающим радиус деформации Россби $L \gg L_R$, в результате неустойчивости порождает вихри с размером порядка L_R и тем самым рождает прямой энергетический каскад – перераспределение энергии с больших масштабов L на более мелкие масштабы L_R . Следующий шаг – эволюция вихрей и, как главный элемент эволюции, вытягивание вихрей под действием фоновых течений. По мере вытягивания поперечный размер вихря уменьшается, приближаясь к размерам мезомасштабных явлений L_{SR} . В результате энергия вихря смешается на размеры L : $L_R \geq L \geq L_{SR}$. Это по-прежнему прямой энергетический каскад. Однако процесс вытягивания вихря по горизонтали сопровождается одновременным возвращением энергии с масштабов вихря на размер крупномасштабных течений. Это обратный энергетический каскад. Таким образом, в предложенной схеме демонстрируются процессы перераспределения энергии от явлений с размером мезомасштаба и субмезомасштаба к крупномасштабным явлениям.

В работе [2] было показано, что максимальной энергией обладают вихри, круглые в плане. Для таких вихрей $\nu=2$. Когда такой вихрь вытягивается до состояния $\nu>2$, он теряет энергию, которая передается обратно течению. Но вытягивание вихря происходит постепенно, что обеспечивает накачку энергии в течение до

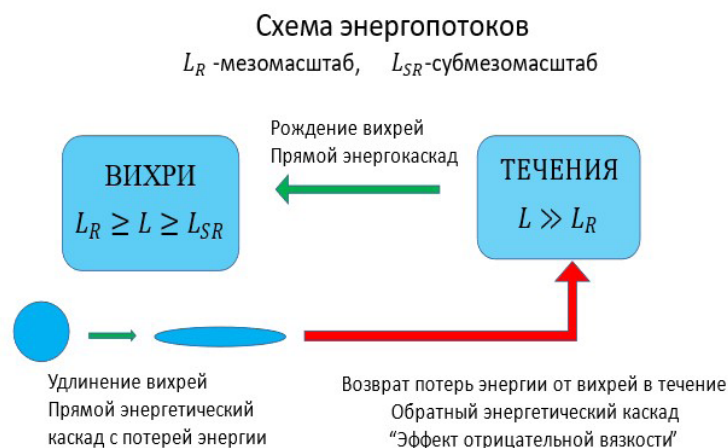


Рис. 2. Схема обмена энергией между течением и вихрем при вытягивании вихря.

тех пор, пока энергия вихря не уменьшится до нуля, что будет соответствовать его уничтожению. Под первоначально рождаемым течением вихрем следует понимать круглый в плане вихрь ($\nu=2$). То есть это тот вихрь, который накапливает в себе энергию, полученную от течения, а дальше – с вытягиванием по горизонтали – только теряет энергию. Пусть энергия такого вихря E_1 . Тогда энергия течения после рождения вихря станет равной $E_0 - E_1$, где E_0 – исходная энергия течения. Зафиксируем n состояний вихря с разными, постепенно увеличивающимися, параметрами $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$, где $\nu_1=2 < \nu_2 < \nu_3 < \dots < \nu_n$. При вытягивании круглого в плане вихря со значением ν_1 до значения ν_2 теряется энергия ΔE_1 , энергия течения становится $(E_0 - E_1 + \Delta E_1)$. Далее при вытягивании от ν_2 до ν_3 теряется еще энергия ΔE_2 , которая идет в течение, и энергия течения становится $(E_0 - E_1 + \Delta E_1 + \Delta E_2)$. Через $(n+1)$ переходов энергия течения будет равна $(E_0 - E_1 + \Delta E_1 + \Delta E_2 + \dots + \Delta E_n)$. Видим, что эволюция системы после рождения вихря, благодаря процессу его вытягивания, сопровождается монотонной перекачкой энергии от вихря к течению, то есть поддерживается обратный энергетический каскад.

Заключение

Итак, мы выяснили, что вихрь, первоначально получая энергию от течения, на стадии вытягивания отдает обратно в течение часть своей энергии. Такой процесс характеризуется обратным энергетическим каскадом или в старой терминологии называется явлением с отрицательной вязкостью. Это означает, что на акватории океана, в зонах, где происходит вытягивание вихрей, следует ожидать интенсификации течений, возможно, струйных течений, и уменьшения эффективной турбулентной вязкости.

Автор благодарен члену-корреспонденту РАН В.В. Жмуру за внимание к работе.

Литература

1. **В.В. Жмур**
Мезомасштабные вихри океана, РФ, Москва, ГЕОС, 2011, 290 с.
2. **В.В. Жмур, Д.А. Арутюнян**
Океанология, 2022, 62(6), (печат.).
3. **В.П. Старр**
Физика явлений с отрицательной вязкостью: пер. с англ., СССР, Москва, Мир, 1971, 261 с.
4. **В.В. Жмур, К.К. Панкратов**
Океанология, 1989, 29(2), 205.
5. **В.В. Жмур, К.К. Панкратов**
Океанология, 1990, 30(2), 170.
6. **Г. Ламб**
Гидродинамика: пер. с англ., СССР, Москва, Ленинград, Гостехтеориздат, 1947, 929 с.

English

The Phenomenon of Negative Viscosity During the Stretching of Synoptic Ocean Eddies by Barotropic Currents*

David A. Harutyunyan
Moscow Institute of Physics and
Technology
9 Institute Lane, Dolgoprudny,
Moscow reg., 141701, Russia
arutyunyan.da@phystech.edu

Abstract

An ensemble of synoptic oceanic vortices, which is influenced by background currents, can be represented as the quasi-two-dimensional mesoscale turbulence. The evolution of vortices in an ensemble can occur according to several scenarios: 1) initial merging of closely spaced vortices of the same name; 2) periodic or quasi-periodic evolution of horizontal dimensions with their limited change; 3) unlimited stretching of vortices in the horizontal plane. The work is aimed at demonstrating the possibility of negative viscosity manifestation in the defined water areas of the World Ocean at the stage of unrestricted stretching of mesoscale vortex structures by horizontal inhomogeneous currents. The reason for the manifestation of negative viscosity in such a system is associated with the loss of energy of the elongated vortices and its redistribution into background currents.

Keywords: ellipsoidal vortex, total vortex energy, negative viscosity, direct and reverse energy cascades.

*The work was financially supported by RFBR (project 09-05-07073).

Images & Tables

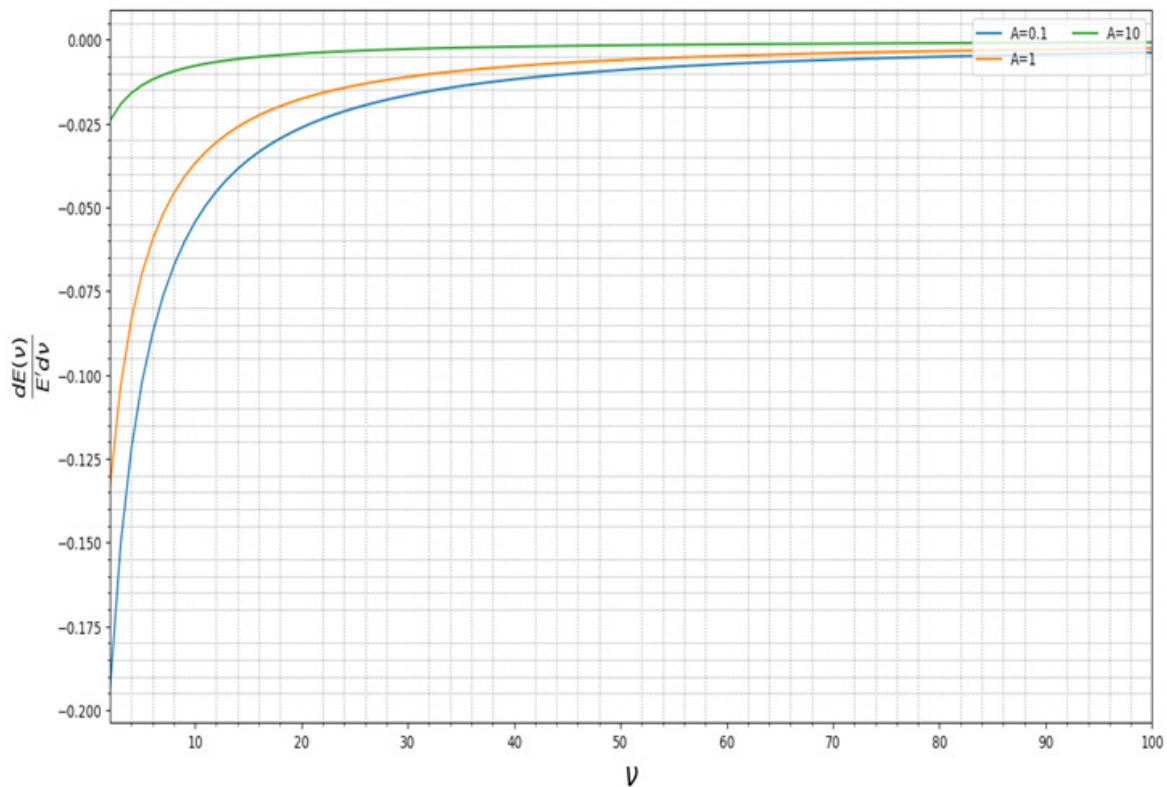


Fig. 1. Graph of the dependence of the change in the relative energy ($\frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dv}$) of the vortex as the parameter v increases for various parameters $A=0.1, 1, 10$.

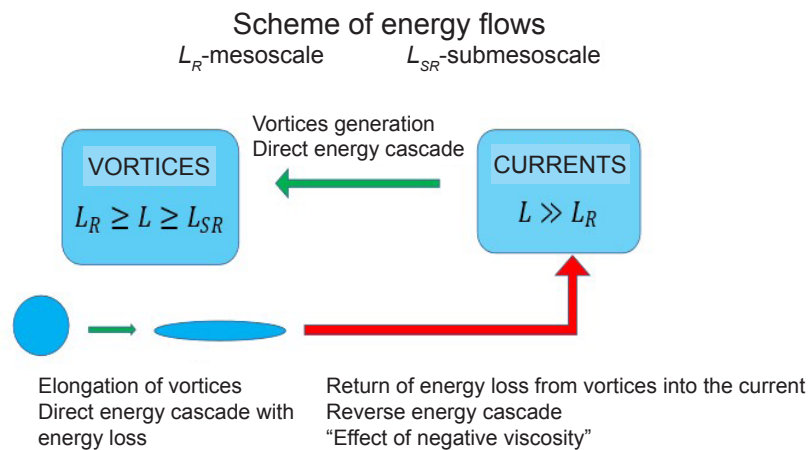


Fig. 2. Scheme of the energy exchange between the current and the vortex when the vortex is pulled out.

References

- V.V. Zhmur
Mesoscale Oceanic Vortices, [Mezomasshtabnye vikhri okeana], RF, Moscow, GEOS, 2011, 290 pp. (in Russian).
- V.V. Zhmur, D.A. Harutyunyan
Oceanology, 2022, **62**(6), (in print).
- V.P. Starr
Physics of Negative Viscosity Phenomena, Ser. Earth & Planetary Science, USA, NY, New York, MacGraw-Hill Book Comp., 1968, 256 pp.
- V.V. Zhmur, K.K. Pankratov
Okeanologiya [Russ. Oceanology], 1989, **29**(2), 205 (in Russian).
- V.V. Zhmur, K.K. Pankratov
Okeanologiya [Russ. Oceanology], 1990, **30**(2), 170 (in Russian).
- H. Lamb
Hydrodynamics: 6th Ed., USA, NY, New York, Dover Publ., 1945 (1932 reprint), 738 pp.





Подписано в печать 25.11.2022. Формат 60 x 90 1/8.
Печ. л. 17,5. Тираж 300 экз.

Отпечатано в ООО «Полиграфическая компания «ЭксПресс»
603104, Н. Новгород, ул. Медицинская, д. 26, помещение 1
+7 (831) 278-61-61
print@e-xpress.ru

