

УДК 556.5.04:504.5

## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Е. Ю. Яковлев<sup>1\*</sup>, А. С. Дружинина<sup>1</sup>, С. В. Дружинин<sup>1</sup>,  
Н. Л. Иванченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (набережная Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000), \*yakov24lev99@mail.ru

<sup>2</sup> Центр коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» Северного Арктического федерального университета имени М. В. Ломоносова (ул. Северодвинская, 14, Архангельск, Россия, 163002)

Мурманская область является частью Арктической зоны России и обладает огромным и разнообразным природно-ресурсным потенциалом. Интенсивное развитие горно-добывающей промышленности на Кольском полуострове, разведка и освоение новых запасов полезных ископаемых привели к возрастающему загрязнению металлами вод рек и озер. Данная исследовательская работа направлена на определение качества поверхностных водных экосистем Мурманской области, подверженных сильному антропогенному влиянию. Проведенное исследование основных физико-химических параметров поверхностных вод позволило выявить водоемы как с экстремально высокими, так и с низкими значениями рН, с пониженным окислительно-восстановительным потенциалом, а также с высоким содержанием. Исследование пространственного распределения концентраций широкого круга металлов позволило определить, что Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Mn, Sr, Al и Fe являются основными загрязнителями водоемов Кольского полуострова. С использованием методов статистического анализа выявлены характерные загрязняющие вещества для различных районов, требующих наибольшего внимания и дальнейшего контроля. Проведенные исследования качества поверхностных вод и оценка потенциальных рисков для здоровья человека позволили сделать вывод о сильном загрязнении районов Мончегорска, Оленегорска и Апатитов металлами, значительной токсичности вод и высоком риске возникновения канцерогенных и неканцерогенных эффектов при потреблении исследуемой воды. Результаты этого исследования обеспечат информативную основу для будущих оценок риска для окружающей среды и здоровья человека, а также для разработки комплексных мер управления качеством вод озер и рек Кольского полуострова.

Ключевые слова: водные объекты; физико-химические свойства; металлы; индексы качества воды; риск здоровья населения; Арктика

Для цитирования: Яковлев Е. Ю., Дружинина А. С., Дружинин С. В., Иванченко Н. Л. Оценка воздействия промышленных выбросов на качество поверхностных вод Кольского полуострова // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 88–101. doi: 10.17076/lim1617

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-77-10057.

**E. Yu. Yakovlev<sup>1\*</sup>, A. S. Druzhinina<sup>1</sup>, S. V. Druzhinin<sup>1</sup>, N. L. Ivanchenko<sup>1,2</sup>.  
ASSESSMENT OF THE IMPACT OF INDUSTRIAL DISCHARGES ON SURFACE  
WATER QUALITY IN THE KOLA PENINSULA**

<sup>1</sup> N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (23 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia), \*yakov24lev99@mail.ru

<sup>2</sup> Arktika Core Facility of the Northern (Arctic) Federal University (14 Severodvinskaya St., 163002 Arkhangelsk, Russia)

The Murmansk Region is part of the Russian Arctic enormously rich in diverse natural resources. The intensive development of the mining industry on the Kola Peninsula, the exploration and exploitation of new mineral reserves have augmented the pollution of surface waters in rivers and lakes with metals. The aim was to assess the quality of surface water ecosystems exposed to heavy anthropogenic pressure in the Murmansk Region. The analysis of the main physical and chemical parameters of surface waters revealed water bodies with both extremely high and low pH values, with low redox potential, and high salinity. The study of the spatial distribution of concentrations of a wide range of metals showed that Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Mn, Sr, Al, and Fe were the main pollutants of water bodies in the Kola Peninsula. Using statistical analysis techniques were identified the pollutants characteristic for different areas, which require closer attention and further control. The assessment of the quality of surface waters and potential risks to human health led to the conclusions that Monchegorsk, Olenegorsk and Apatity areas were heavily polluted with metals, water toxicity in the areas is high, and the use of this water is fraught with a high risk of carcinogenic and non-carcinogenic effects. The results of this study will serve as a background for future environmental and health risk assessments, as well as for the development of an integrated set of actions for surface water quality management on the Kola Peninsula.

Keywords: water bodies; physical and chemical properties; metals; water quality indices; public health risk; Arctic

For citation: Yakovlev E. Yu., Druzhinina A. S., Druzhinin S. V., Ivanchenko N. L. Assessment of the impact of industrial discharges on surface water quality in the Kola Peninsula. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 88–101. doi: 10.17076/lim1617

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant # 20-77-10057.

## Введение

Загрязнение водной среды металлами вызывает озабоченность во всем мире из-за их потенциальной токсичности [Kumar et al., 2019]. Перенос металлов в водную среду происходит из естественных и техногенных источников. Основными природными источниками металлов являются выветривание горных пород, высвобождение из донных отложений, взаимодействие воды с почвой [Huffmeyer et al., 2009]. Техногенные источники включают прямые сбросы сточных вод в реки и озера в процессе добычи руды, работы горнодобывающих и металлургических заводов. Концентрация металлов также увеличивается в результате поступления бытовых, промышленных сточных вод, оросительной воды и атмосферных выбросов [Ji et al., 2018].

Возрастание техногенной нагрузки на водосборные территории ведет к увеличению загрязнения поверхностных вод металлами. Данные элементы имеют склонность к биоаккумуляции в пищевой цепи и относятся к классу консервативных загрязняющих веществ, которые не разлагаются в природных водах, а только изменяют форму нахождения [Haque et al., 2019]. Загрязнение водной среды металлами привлекло большое внимание из-за того, что оно может нанести необратимый ущерб здоровью человека [Chowdhury et al., 2016]. Воздействие данных загрязнителей может привести к физическим, мышечным и неврологическим расстройствам, к умственным нарушениям, потере слуха, зрительной и двигательной функции [Chowdhury et al., 2016; Saha, Paul, 2019]. Длительное воздействие может вызвать бо-

лезнь Альцгеймера, Паркинсона, рассеянный склероз и рак [Tchounwou et al., 2012].

Кольский полуостров является частью Арктической зоны России и обладает разнообразным природно-ресурсным потенциалом. Экологическая ситуация в округе формируется под влиянием предприятий горнодобывающей, горнообработывающей и металлургической промышленности на окружающую среду. В недрах Кольского полуострова открыто более 60 крупных месторождений различных видов минерального сырья [Качество..., 2020]. В настоящее время происходит добыча медно-никелевых, железных, нефелин-апатитовых руд, руд алюминиевого сырья, циркония, редкоземельных металлов, вермикулита, кобальта, платины и многих других [Даувальтер, Кашулин, 2015; Кашулин и др., 2019; Качество..., 2020].

Основными источниками загрязнения водных объектов Мурманской области являются сточные воды таких горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, как АО «Кольская горно-металлургическая компания (ГМК)»; АО «Апатит»; АО «Ковдорский горно-обогательный комбинат (ГОК)»; ООО «Ловозерский ГОК»; АО «Олкон». Изменения химического состава поверхностных вод вызваны как поступлением поллютантов из техногенных водоемов-отстойников, массивов отвальных пород и атмосферных выбросов, так и нарушением естественного гидродинамического и гидрохимического режима поверхностных и подземных вод [Даувальтер, Кашулин, 2015; Даувальтер, Даувальтер, 2019; Кашулин и др., 2019; Dauvalter et al., 2020]. В реках и озерах Мурманской области наблюдаются высокие и экстремально высокие уровни загрязненности воды соединениями металлов, фторидами, сульфатами, соединениями минерального азота. Основными загрязняющими металлами на территории Кольского полуострова являются Al, Cu, Ni, Mn, Fe, Cr, Co, V, Mo и Zn [Даувальтер, Кашулин, 2014, 2018]. Также значительный вклад в загрязнение вод вносят предприятия жилищно-коммунального хозяйства и хозяйственно-бытовые сточные воды. Следствием загрязнения является резкое ухудшение качества поверхностных вод. Так, например, питьевая вода, поступающая в г. Мончегорск из оз. Имандра, характеризуется относительно высоким содержанием Ni (11,6 мкг/л), Cu (12,1 мкг/л), Cd (0,30 мкг/л) и др. [Moiseenko et al., 2018]. К сожалению, существующие в Мурманской области системы водоподготовки не способны удалить металлы из питьевой воды. Вследствие этого обнаружены повышенные концентрации Ni, Cu, Co, Cd и Pb в печени и почках жителей Мончегорска,

Апатитов, Оленегорска и Ловозера [Moiseenko et al., 2018].

Таким образом, актуальной представляется современная оценка качества водных экосистем Мурманской области. В связи с этим целью исследования является оценка: 1) воздействия горнодобывающей промышленности на состояние водных объектов Мурманской области; 2) влияния их загрязнения на здоровье человека. Результаты исследования обеспечат информативную основу будущих оценок риска для окружающей среды и здоровья человека, а также для разработки комплексных мер управления качеством поверхностных вод Кольского полуострова.

## Материалы и методы

Район исследований расположен на северо-западе европейской части России, на Кольском полуострове (рис. 1). Отбор проб производился в июле 2020 г. В число опробованных водных объектов входят 62 водотока (река, канал или ручей) и 44 озера. В каждом водном объекте однократно отбиралось от 1 до 3 проб (горизонт 0 м), в зависимости от размеров водоема. Общее число проб воды – 125. В район исследований входит 9 участков: L-1 – Южные фоновые территории (31 водоем, 32 пробы), L-2 – г. Ковдор (6 водоемов, 7 проб), L-3 – г. Кировск (6 водоемов, 7 проб), L-4 – г. Апатиты (8 водоемов, 11 проб), L-5 – г. Мончегорск (18 водоемов, 25 проб), L-6 – г. Оленегорск (12 водоемов, 16 проб), L-7 – п. Ревда (11 водоемов, 10 проб), L-8 – с. Ловозеро (3 водоема, 5 проб), L-9 – Северные фоновые территории (9 водоемов, 12 проб). Фоновые территории отличаются пониженной техногенной нагрузкой со стороны горно-обогательных комбинатов и стоков жилищно-коммунальных хозяйств.

Измерения показаний pH, Eh, содержания проводили непосредственно в воде исследуемых объектов портативным многопараметровым pH/ОВП-метром HI 9126 (pH/ORP/T) (США, Hanna Instruments), измерение содержания воды (TDS) проводили кондуктометром MAPK-603/1 («ВЗОР», Россия).

Отбор проб воды на анализ микроэлементов проводили в одноразовые стерильные пробирки объемом 50 мл из полимерного материала. Воду фильтровали одноразовым стерильным шприцем через одноразовый мембранный фильтр с полиэфирсульфоновой мембраной с размером пор 0,45 мкм (TPP Techno Plastic Products AG, Швейцария), далее добавляли конц. HCl («Вектон», Россия) до pH < 2 для консервации. Определение

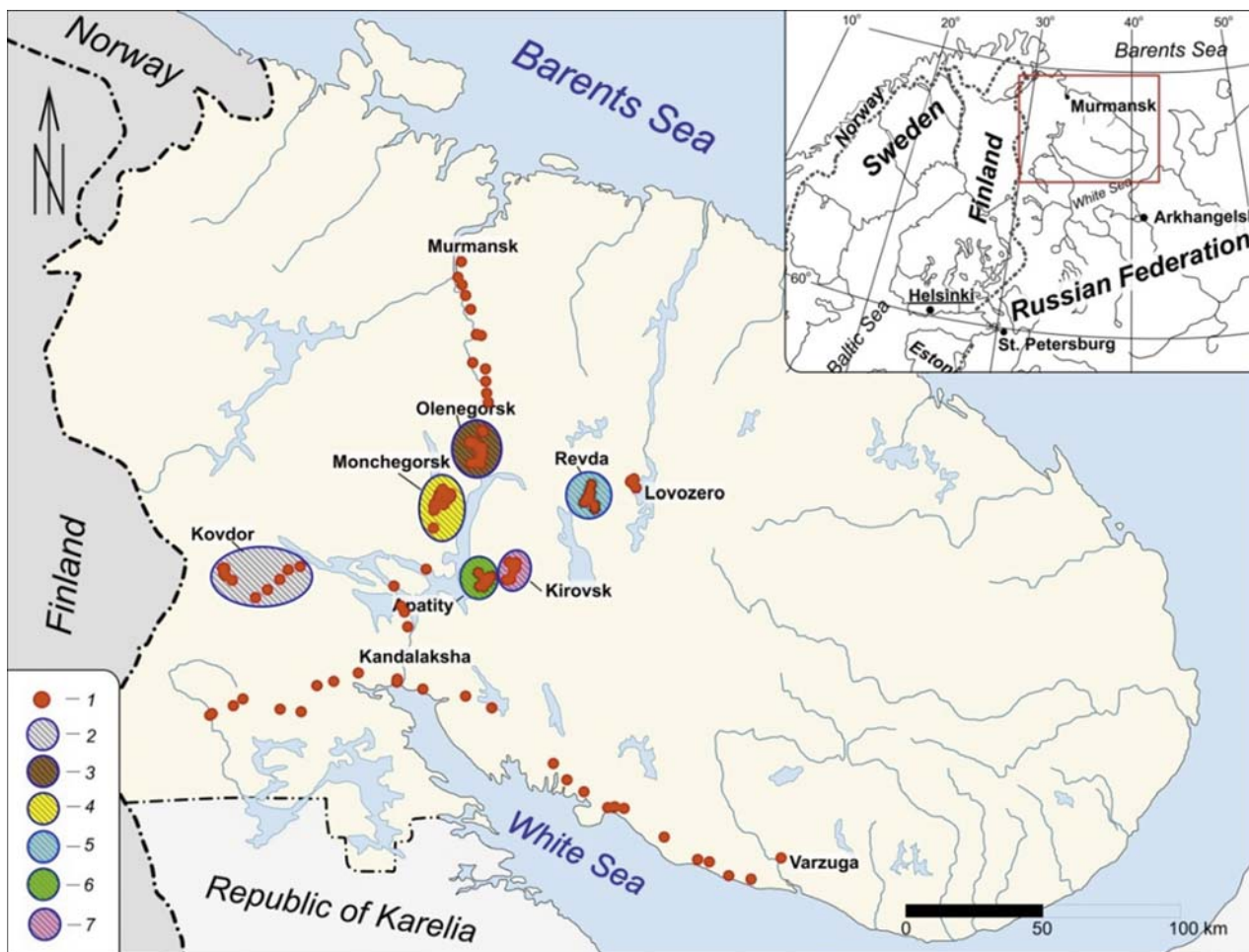


Рис. 1. Расположение точек отбора проб и характер горно-обогатительной деятельности исследуемых районов: 1 – точки отбора проб; 2 – добыча и переработка бадделеит-апатит-магнетитовых руд (г. Ковдор, район L-2); 3 – добыча железной руды (г. Оленегорск, район L-6); 4 – переработка медно-никелевых руд (г. Мончегорск, район L-5); 5 – добыча и переработка лопаритовой руды (п. Ревда, район L-7); 6 – переработка апатито-нефелиновых руд (г. Апатиты, район L-4); 7 – добыча апатит-нефелиновой руды (г. Кировск, район L-3)

Fig. 1. Location of the sampling sites and type of mining and processing activity of the studied areas: 1 – sampling sites; 2 – mining and processing of baddeleyite-apatite-magnetite ores (Kovdor, location L-2); 3 – iron ore mining (Olenegorsk, location L-6); 4 – copper-nickel ores processing (Monchegorsk, location L-5); 5 – mining and processing of loparite ore (Revda, location L-7); 6 – apatite-nepheline ore processing (Apatity, location L-4); 7 – apatite-nepheline ore mining (Kirovsk, location L-3)

концентраций Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, V, As, Sr, Mg, Fe в пробах воды выполнялось согласно методике [М 03-505-119-03..., 2003] с помощью атомно-абсорбционного спектрометра Shimadzu AA-7000 (Япония) с пламенным и электротермическим атомизаторами. Метод заключается в распылении определяемых элементов путем нагрева образца до высокой температуры при распылении в пламя (Cu, Zn, Sr, Mg, Fe) или в графитовой печи (Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, V, As, Fe) и измерении поглощения излучения резонансной длины волны

атомарными парами определяемого элемента. Относительная погрешность метода по отношению к металлам (%): Al – 30, As – 30, Ba – 29, Cd – 16, Co – 30, Cr – 30, Cu – 24, Fe – 22, Mg – 11, Mn – 15, Ni – 14, Pb – 30, Sr – 15, V – 25, Zn – 20. Качество анализа обеспечивалось тремя параллельными измерениями в одной пробе-емкости (в таблицах указаны средние значения), а также своевременной калибровкой атомно-абсорбционного спектрометра по ГСО.

Индекс оценки металлов (НМЕI) предоставляет информацию об общем качестве

воды по отношению к металлам и рассчитывается с использованием уравнения (1):

$$HMEI = \sum_{i=1}^n \frac{HM_{Conc}}{HM_{MPC}}, \quad (1)$$

где  $HM_{Conc}$  – концентрация металлов, а  $HM_{MPC}$  – ПДК того же металла. Пороговое значение 1,0 означает, что при  $HMEI < 1,0$  вода пригодна, а при значении  $> 1,0$  – непригодна для бытового использования [Zakir et al., 2020]. Также используется классификация уровней загрязнения воды [Haque et al., 2019]:  $< 0,3$  – очень чистая,  $0,3-1,0$  – чистая,  $1,0-2,0$  – слегка загрязнена,  $2,0-4,0$  – умеренно загрязнена,  $4,0-6,0$  – сильно загрязнена,  $> 6,0$  – серьезно загрязнена.

Индекс токсичности металлов (HMTL) рассчитывается как произведение содержания металлов в воде ( $C_i$ , мг/л) на их суммарный балл опасности ( $HIS_i$ , табл. 1) по уравнению (2):

$$HMTL = \sum_{i=1}^n C_i \times HIS_i. \quad (2)$$

В рамках проведенных исследований введена классификация вод: 0–100 – низкая токсичность; 100–300 – умеренная токсичность; 300–500 – высокая токсичность; 500–1000 – очень высокая токсичность; выше 1000 – чрезвычайно высокая токсичность.

Неканцерогенный риск для здоровья населения ( $HI_{ing}$ ,  $HI_{derm}$ ). Определялось воздействие металлов при проглатывании воды и всасывании через кожу. Поглощенная

доза для человека рассчитывается на основе хронического суточного поступления (ADD) [Kumar et al., 2019] с использованием уравнений 3 и 4:

$$ADD_{ing} = \frac{C_i \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}, \quad (3)$$

$$ADD_{derm} = \frac{C_i \times SA \times K_p \times ET \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}, \quad (4)$$

где  $ADD_{ing}$  (мкг/кг в день) и  $ADD_{derm}$  (мкг/кг в день) – средние суточные дозы при проглатывании и абсорбции воды через кожу [Kumar et al., 2019]. В уравнениях (3) и (4)  $C_i$  – концентрация металла (мкг/л),  $IR$  – скорость приема внутрь (2,0 л/день),  $EF$  – частота воздействия (350 дней),  $ED$  – продолжительность воздействия (30 лет),  $BW$  – масса тела (70 кг),  $AT$  – среднее время (10 950 дней),  $SA$  – открытая площадь кожи (18 000 см<sup>2</sup>),  $K_p$  – коэффициент прилипания к коже (табл. 1),  $ET$  – время воздействия (0,58 ч/сут),  $CF$  – коэффициент пересчета (0,001).

Коэффициент опасности (HQ) рассчитывался по уравнению (5):

$$HQ_{ing/derm} = \frac{ADD_{ing/derm}}{RfD_{ing/derm}}, \quad (5)$$

где  $RfD_{ing}$  и  $RfD_{derm}$  – пероральные и кожные эталонные дозы (мкг/кг день) (табл. 1),  $HQ_{ing}$  и  $HQ_{derm}$  – коэффициенты опасности при проглатывании и при абсорбции через кожу.

$HI$  представляет собой общий потенциальный неканцерогенный риск для здоровья насе-

Таблица 1. Значения параметров микроэлементов

Table 1. Values of the microelement parameters

Элемент Element	$C_i$ , мкг/л $C_i$ , µg/l	$HIS_i$	$K_p$	$RfD_{ing}$	$RfD_{derm}$	SF, мг/л SF, mg/l
Al	200	685	$1 \cdot 10^{-3}$	1,3	0,07	-
Cr	50	895	$2 \cdot 10^{-3}$	3	0,08	0,5
Mn	500	797	$1 \cdot 10^{-3}$	24	0,96	-
Co	100	1011	$4 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,06	-
Ni	20	993	$2 \cdot 10^{-4}$	20	0,8	1,7
Cu	2000	805	$1 \cdot 10^{-3}$	40	8	-
Zn	3000	913	$6 \cdot 10^{-4}$	300	60	-
Cd	3	1318	$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,03	15
Ba	1300	800	$1 \cdot 10^{-3}$	70	14	-
Pb	10	1531	$1 \cdot 10^{-4}$	1,4	0,42	0,0085
V	-	648	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,01	-
As	10	1676	$1 \cdot 10^{-3}$	0,3	0,12	1,5
Sr	-	0	$1 \cdot 10^{-3}$	600	120	-
Mg	-	0	$1 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Fe	300	0	$1 \cdot 10^{-3}$	700	140	-

ления. Он рассчитывается с использованием уравнения (6) [Zakir et al., 2020]:

$$HI_{ing/derm} = \sum_{i=0}^n HQ_{ing/derm}. \quad (6)$$

Пороговое значение HI установлено на уровне 1,0, т. е. при HI 1,0 высока возможность неканцерогенного риска для здоровья населения.

Канцерогенный риск для здоровья (CR) в течение жизни возникает при воздействии Cr, Ni, Cd, As, Pb. Потенциальные канцерогенные риски рассчитываются путем умножения ADD и коэффициента (SF, мг/л день, табл. 1) [Kumar et al., 2019] по уравнению 7:

$$CR_{ing/derm} = ADD_{ing/derm} \times SF. \quad (7)$$

CR перорального и кожного воздействия канцерогенов учитывали при расчете общего  $\Sigma CR$ . Допустимый диапазон  $\Sigma CR$  составляет от  $1,0 \times 10^{-6}$  до  $1,0 \times 10^{-4}$ , а значения  $> 10^{-4}$  указывают на высокий риск развития рака.

Статистический анализ, а именно анализ главных компонент (АГК), проведен для выявления возможных источников загрязнения в исследуемых поверхностных водах. Данные проанализированы с использованием статистического программного обеспечения IBM SPSS Statistics 20, для анализа были выбраны 2–3 компоненты.

## Результаты и обсуждение

### *Физико-химические свойства поверхностных вод*

Физико-химические свойства (рН, Eh, минерализация) исследованных поверхностных водных объектов Кольского полуострова представлены в таблице 2. Средние значения рН воды для исследуемой территории варьируются от 6,90 до 8,95 единиц, притом по рекомендации ВОЗ для питьевой воды значения рН должны находиться в пределах 6,5–8,5 ед. В целом значения рН ниже 6,5 наблюдаются для 4 % отобранных проб, в то время как значения рН выше 8,5 получены для 13,6 % проб, что позволяет сделать вывод о проблеме защелачивания водоемов Мурманской области. Наибольшие опасения вызывают районы L-3–L-5, а также L-2 и L-7. Низкие значения рН характерны для озер, находящихся на территории химического выгорания растительности (например, озера в Мончегорске (L-5)), тогда как повышенные значения рН характерны для рек и озер, подверженных влиянию промышленных

сточных вод (например, реки Белая и Жемчужная). Ранее было отмечено, что вблизи горно-металлургического комбината «Печенганикель» наблюдается рост значений рН озерных вод на 0,5–1,0 ед. [Даувальтер, Кашулин, 2018], что обусловлено накоплением породообразующих макроэлементов, содержащихся в выбросах комбината.

Среднее значение окислительно-восстановительного потенциала в исследуемых поверхностных водах варьируется от –110,7 до 6,4 мВ, следовательно, в исследуемых водах происходят как окислительные, так и восстановительные процессы. Обычно восстановительная среда (Eh < 0) в природных условиях наблюдается в грунтовых водах за счет присутствия сероводорода и металлов с низкой валентностью (Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Mo<sup>4+</sup>, V<sup>4+</sup>, U<sup>4+</sup>), однако для большинства исследуемых территорий (L-1–L-4, L-6 и L-7) определен восстановительный режим.

Солесодержание поверхностных вод Кольского полуострова варьируется в широких пределах (9,4–3323 мг/л), средние значения находятся в интервале от 49,4 до 282 мг/л. Повышенное солесодержание характерно для некоторых водоемов из районов L-2, L-5 и L-7, притом в озерах вблизи отвалов Мончегорского участка Кольской ГМК солесодержание превышает допустимое значение (выше 1000 мг/л), установленное ВОЗ. Стоит отметить, что в нескольких озерах, расположенных в районе деятельности комбинатов «Североникель», «Апатит», «Ковдорский ГОК», солесодержание в зависимости от времени года изменяется в пределах 23,2–2651 мг/л [Даувальтер, 2019; Dauvalter et al., 2020], что, вероятно, связано с сезонным сбросом сточных вод.

### *Содержание металлов в поверхностных водах*

Для водных объектов в районах L-2–L-8 наблюдается превышение средних концентраций всех элементов (за исключением Cr) в 2 и более раз по сравнению со средним содержанием металлов в поверхностных водах фоновых территорий (табл. 2).

Так, относительно средних фоновых концентраций для района г. Ковдор (L-2) отмечено превышение Sr, Ba, Co, Mg и Ni. Наиболее загрязненными являются руч. Безымянный у отвалов Ковдорского ГОКа и оз. Безымянное, в котором накапливаются техногенные воды комбината, – в них обнаружены Sr (до 3,08 мг/л), Co (до 2,92 мкг/л), Mg (до 48 мг/л), Ba (до 117 мкг/л) и Ni (до 25 мкг/л). Ковдорский

Таблица 2. Физико-химические свойства и содержание металлов в поверхностных водах Кольского полуострова  
 Table 2. Physical and chemical properties and content of metals in the surface waters of the Kola Peninsula

Район отбора Sampling area	Физико-химические свойства Physiochemical properties											Содержание металлов в воде, мкг/л Metal content in water, µg/l										
	pH	Eh, mV	TDS	Mg	Fe	Sr	Al	Ni	Mn	Ba	Cu	Zn	Cr	V	Co	As	Pb	Cd				
L-1	min	4,25	-50,9	9,4	499	20	13	1,2	0,6	1,6	нпо*	нпо	0,9	0,14	0,02	нпо	нпо	нпо				
	max	9,12	123,9	875	26500	978	257	5,8	38,0	15,0	3,60	31,0	5,1	15,0	0,27	0,89	0,246					
	aver.	<b>7,13</b>	<b>-7,31</b>	<b>49,4</b>	<b>2016</b>	<b>200</b>	<b>41</b>	<b>2,8</b>	<b>5,0</b>	<b>6,0</b>	<b>0,60</b>	<b>2,52</b>	<b>2,6</b>	<b>1,80</b>	<b>0,06</b>	<b>0,15</b>	<b>0,029</b>					
L-2	min	7,71	-99,2	84,8	5430	16	3	3,9	0,9	30,0	0,08	нпо	1,4	1,90	0,17	0,09	нпо	нпо				
	max	8,78	-41,1	737	48000	89	106	25,0	29,0	2,24	3,90	4,3	2,50	2,92	0,44	нпо	0,039					
	aver.	<b>8,19</b>	<b>-70,76</b>	<b>256</b>	<b>19039</b>	<b>57</b>	<b>1080</b>	<b>10,7</b>	<b>6,1</b>	<b>79,7</b>	<b>0,81</b>	<b>1,28</b>	<b>2,8</b>	<b>2,20</b>	<b>0,67</b>	<b>0,23</b>	<b>0,006</b>					
L-3	min	7,34	-189,9	16,1	78	20	16	1,1	0,3	1,5	0,14	нпо	1,2	0,11	нпо	0,03	нпо	нпо				
	max	9,97	-19,4	238	1920	55	194	8,1	6,9	9,0	1,40	2,70	3,1	3,70	0,20	2,80	0,357					
	aver.	<b>8,95</b>	<b>-110,7</b>	<b>108</b>	<b>532</b>	<b>32</b>	<b>81</b>	<b>3,5</b>	<b>1,7</b>	<b>4,2</b>	<b>0,93</b>	<b>0,65</b>	<b>1,9</b>	<b>1,33</b>	<b>0,10</b>	<b>0,93</b>	<b>0,113</b>					
L-4	min	6,89	-154,7	9,4	349	33	11	2,5	0,9	0,9	0,33	нпо	1,0	0,11	0,02	нпо	нпо	нпо				
	max	9,58	4,0	335	9220	499	806	37,0	431	533	13,0	138	18,0	15,0	0,55	2,60	8,80		0,273			
	aver.	<b>8,23</b>	<b>-72,2</b>	<b>132</b>	<b>1668</b>	<b>108</b>	<b>193</b>	<b>9,3</b>	<b>44,4</b>	<b>57,7</b>	<b>2,38</b>	<b>13,2</b>	<b>3,6</b>	<b>3,83</b>	<b>0,20</b>	<b>0,95</b>	<b>0,804</b>		<b>0,114</b>			
L-5	min	3,71	-146,6	14,0	716	14	4	12,0	0,5	1,6	3,30	0,54	0,2	0,32	0,07	0,07	нпо	нпо	нпо			
	max	9,51	195,0	3323	11700	415	872	3420	64,0	45,0	2350	28,0	3,5	30,0	53,0	2,70	3,70	0,745				
	aver.	<b>6,90</b>	<b>6,4</b>	<b>282</b>	<b>4801</b>	<b>100</b>	<b>71</b>	<b>434</b>	<b>15,3</b>	<b>13,7</b>	<b>188</b>	<b>4,73</b>	<b>1,3</b>	<b>4,53</b>	<b>6,58</b>	<b>0,70</b>	<b>0,242</b>	<b>0,086</b>				
L-6	min	6,76	-81,3	16,7	1100	11	7	4,1	3,5	3,9	0,88	нпо	1,6	0,21	0,05	0,11	нпо	нпо	нпо			
	max	8,41	12,9	395	20000	3970	2120	47,0	947	77,0	8,80	44,0	6,2	2,80	1,24	0,36	5,00	0,087				
	aver.	<b>7,50</b>	<b>-29,1</b>	<b>119</b>	<b>6226</b>	<b>579</b>	<b>182</b>	<b>15,6</b>	<b>85,1</b>	<b>27,1</b>	<b>2,82</b>	<b>4,71</b>	<b>3,2</b>	<b>0,75</b>	<b>0,41</b>	<b>0,21</b>	<b>0,389</b>	<b>0,013</b>				
L-7	min	6,67	-176,3	13,2	100	22	11	нпо	0,9	0,7	0,15	4,70	0,3	0,05	нпо	0,02	нпо	нпо	нпо			
	max	10,01	19,1	1168	2210	329	884	2,7	169	17,0	2,50	0,52	1,4	1,50	0,16	9,70	0,684	0,029				
	aver.	<b>8,11</b>	<b>-63,3</b>	<b>145</b>	<b>792</b>	<b>130</b>	<b>133</b>	<b>1,3</b>	<b>24,6</b>	<b>3,8</b>	<b>0,63</b>	<b>1,98</b>	<b>0,9</b>	<b>0,62</b>	<b>0,04</b>	<b>1,31</b>	<b>0,068</b>	<b>0,004</b>				
L-8	min	6,54	-7,8	20,7	1100	577	20	1,6	28,0	5,0	0,30	1,10	0,8	0,29	0,09	0,06	нпо	нпо	нпо			
	max	7,13	28,5	38,3	4190	1260	266	13,0	161	17,0	3,90	31,0	9,5	0,56	0,47	0,19	1,90	0,058				
	aver.	<b>6,90</b>	<b>6,1</b>	<b>28,7</b>	<b>2442</b>	<b>917</b>	<b>78</b>	<b>6,4</b>	<b>96,0</b>	<b>9,2</b>	<b>1,69</b>	<b>8,88</b>	<b>3,9</b>	<b>0,41</b>	<b>0,18</b>	<b>0,10</b>	<b>0,380</b>	<b>0,012</b>				
L-9	min	6,59	-27,40	11,3	719	20	3	2,7	нпо	2,8	0,43	нпо	1,4	0,17	нпо	0,02	нпо	нпо	нпо			
	max	7,45	25,30	319	10300	274	51	6,4	72,0	14,0	2,60	3,20	3,4	4,70	0,18	0,31	0,036	нпо				
	aver.	<b>6,93</b>	<b>4,28</b>	<b>49,4</b>	<b>2377</b>	<b>130</b>	<b>28</b>	<b>3,9</b>	<b>15,5</b>	<b>5,5</b>	<b>1,26</b>	<b>1,10</b>	<b>2,5</b>	<b>0,67</b>	<b>0,07</b>	<b>0,15</b>	<b>0,009</b>					
Средние фоновые концентрации металлов Average background concentrations of metals					2197	165	34	35	10,3	5,8	0,93	1,81	2,6	1,24	0,07	0,15	0,019	< 0,01				

Примечание. \*нпо – ниже предела обнаружения.  
 Note. \*нпо – below detection limit.

ГОК производит апатитовый, бадделеитовый и железорудный концентрат. Стронций является типоморфным элементом нефелиновых сиенитов Хибинского массива [Кашулин и др., 2019; Dauvalter et al., 2020].

Водоемы в районе г. Кировска (L-3) характеризуются превышением содержания Cd, As, Sr и Al. Основным источником загрязнения в данном районе является ГОК «Апатит», занимающийся производством фосфатного сырья из апатито-нефелиновых руд. Наиболее сильное воздействие наблюдается в реках Лопарская и Юкспорройк (Cd до 0,357 мкг/л, As до 2,80 мкг/л, Sr до 332 мкг/л и Al до 194 мкг/л), в которые производится сброс сточных вод из рудников Кировский и Рассвумчоррский соответственно, и также для этих рек необходимо отметить экстремальную щелочную реакцию среды (рН до 9,6). Указанные реки впадают в оз. Б. Вудъявр, где исследования донных отложений выявили высокий уровень загрязнения металлами (Cu, Zn, Ni, Sr и др.) [Югай и др., 2013].

В водах озер и рек г. Апатиты (L-3) наблюдается повышенное относительно фоновых концентраций содержание Pb, Cd, Ba, Zn, As, Al, Sr, Mn, V, Co, Ni и Cu. Максимальное содержание металлов определено для рек Белая и Жемчужная (мкг/л): Pb – до 8,82, Ba – до 533, Zn – до 138, Cd – до 0,277, Al – до 806, Cu – до 13,0, Ni – до 37,0, As – до 2,63 и Co – 0,55. Загрязнение рек обусловлено сбросами сточных вод филиала ГОК «Апатит», производящего минеральные удобрения [Кашулин и др., 2019; Mazukhina et al., 2020]. Приоритетными загрязнителями являются Sr, Pb, Zn, Al, Fe и т. д. [Evseev, Krasovskaya, 2017]. Значительный вклад в загрязнение р. Жемчужной вносят предприятие жилищно-коммунального хозяйства «Апатитыводоканал» и очистные сооружения п. Титан [Кашулин и др., 2019].

Наиболее загрязненным районом исследования является г. Мончегорск (L-5), где в поверхностных водах выявлены экстремальные концентрации Cu и Ni, а также повышенное содержание Co, Pb, Cd, As, V, Zn, Ba, Mg и Al. Обнаружено, что вода в озерах, расположенных на территории химической деградации почвенного и растительного покрова, содержит критические концентрации (мкг/л) Cu (до 2350), Ni (до 3420), Co (до 53,3), Pb (до 3,73), Cd (до 0,745), Al (до 872), As (до 2,70), Zn (до 28,0), V (до 15,1), Ba (до 45), Mn (до 64) и Mg (до 9,23 мг/л). Территория данных озер загрязняется за счет атмосферных кислотных выпадений Мончегорского участка Кольской ГМК,

которая добывает сульфидные медно-никелевые руды и производит цветные металлы [Denisov et al., 2020]. В исследованиях [Moiseenko et al., 2018] для воды из оз. Монче авторы определили следующие концентрации (мкг/л): Cu – 12,1, Ni – 11,6, Co – 0,4, Pb – менее 0,5, Cd – 0,3 и Al – 39, что ниже средних концентраций Cu, Ni, Co и Al в настоящем исследовании. Вероятно, оз. Монче менее подвержено техногенному загрязнению, вследствие чего является источником питьевой воды для Мончегорска.

Для водоемов в районе г. Оленегорска (L-6) характерно превышение содержания Pb, Mn, Co, Al, Ba, Sr, Ni, Fe, Cu и Mg относительно их фоновых концентраций. Наиболее загрязненными водными объектами в районе являются озера, в которые сбрасываются стоки с хвостохранилищ – в них содержатся высокие концентрации (мкг/л) Pb (до 5,00), Al (до 2120), Fe (до 3970), Co (до 1,24), Ni (до 47,0), Ba (до 77,0), Sr (до 438) и Mn (до 128), а также большое оз. Пермус, в северной части которого выявлен очаг загрязнения такими металлами, как Mn (947 мкг/л), Pb (1,13 мкг/л), Fe (3030 мкг/л), Co (1,15 мкг/л), Al (499 мкг/л), Cd (0,087 мкг/л) и Cu (8,80 мкг/л). Оленегорский ГОК «Олкон», разрабатывающий Оленегорское железорудное месторождение, является основным загрязнителем данного района исследования. В озерах, принимающих стоки «Олкона», зафиксировано наибольшее содержание (мкг/л) Ni (5,4), Cu (5,1), Co (0,38), Al (52) и Sr (113) [Даувальтер, 2019]. Озеро Пермус загрязнено сточными водами Оленегорского механического завода [Даувальтер, 2019].

Исследование водных объектов в районе п. Ревда (L-7) показало превышение концентраций As, Al, Pb, Sr и Mn. В этом районе озеро, располагающееся у отвалов Ловозерского ГОКа, характеризуется наиболее высоким содержанием (мкг/л) As (9,74), Pb (0,684), Al (884), Ba (17,0), Cu (2,50) и Sr (71). Ловозерский ГОК ведет добычу и переработку танталниобиевых руд и редкоземельного сырья для получения лопаритового концентрата.

В поверхностных водах с. Ловозеро (L-8) наблюдается повышенное содержание Pb, Mn, Fe, Sr, Co и Al относительно фоновых концентраций. Одна из проб в р. Вирма показала высокие концентрации (мкг/л) Pb (1,96), Mn (161), Al (266), Fe (1260), Cd (0,058), Sr (192), Cu (3,9), Cr (0,3), Zn (3,10), Ba (17,0), Co (0,07) и Ni (6,9). По литературным данным [Moiseenko et al., 2018], в районе с. Ловозеро поверхностные воды содержат (мкг/л)



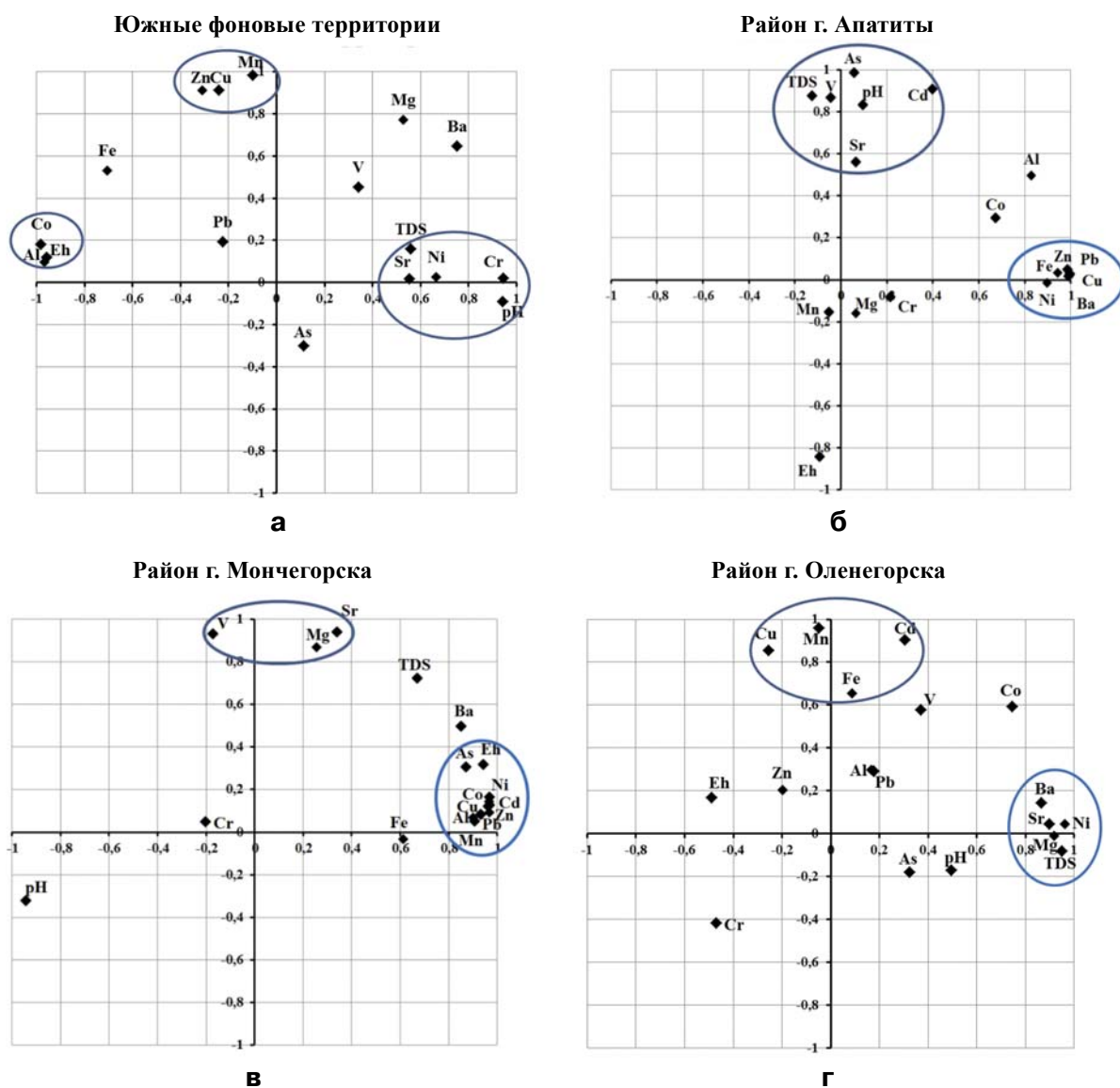


Рис. 2. Анализ главных компонент для четырех исследуемых районов: а – Южные фоновые территории, б – район г. Апатиты, в – район г. Мончегорска, г – район г. Оленегорска

Fig. 2. Principal component analysis for the four study areas: a – Southern background territories, b – area of the Apatity city, c – area of the Monchegorsk city, d – area of the Olenegorsk city

Pb (менее 0,5), Al (99), Fe (815), Cd (0,13), Sr (51), Cu (1,2), Cr (0,3), Co (0,3) и Ni (0,6), что в большинстве случаев согласуется с результатами настоящего исследования. Воды р. Вирма, вероятно, подвержены загрязнению жилищно-коммунальными стоками. Также загрязненная сточными водами Ловозерского ГОКа р. Сергевань несет свои воды в оз. Ловозеро. Повышенное содержание Fe связано с особенностями поверхностных вод в районе с. Ловозеро, связанными с заболоченностью исследуемой территории [Naymushina et al., 2014].

### Многофакторный статистический анализ

Для определения взаимосвязей и идентификации возможных источников металлов в водах наиболее загрязненных районов (городов Апатиты, Мончегорск и Оленегорск), а также Южной фоновой территории применялся метод анализа главных компонент (PCA). Для Южной фоновой территории метод PCA позволил выделить три группы металлов (рис. 2, а). Первая группа объединяет в себе Cr, Ni, Sr, а также наблюдаемое повышение солесодержания и pH. Во вторую группу входят Co, Al, от-

мечаемый рост показателя Eh и снижение pH. Третья группа объединяет в себе Zn, Cu и Mn. Вероятно, данные группы образовались в результате воздействия природных факторов, однако они могут быть обусловлены и переносом атмосферных осадков металлургических предприятий на большие расстояния.

Для района г. Апатиты выявлены две группы металлов, которые, вероятно, имеют различные источники поступления (рис. 2, б). Первая группа объединяет в себе Fe, Zn, Pb, Cu, Ba и Ni. Ко второй группе относятся V, As, Cd, Sr, вместе с наблюдаемым повышением содержания и pH и уменьшением показателя Eh. Наиболее вероятно обе выявленные группы металлов связаны с загрязнением рек двумя источниками сточных вод апатит-нефелиновой обогатительной фабрики предприятия «Апатит». Сообщается, что сточные воды апатит-нефелиновых горно-обогатительных производств содержат повышенные концентрации Al, Sr, Fe, Mn и др., а за счет пыления хвостов происходит загрязнение следующими элементами: Al, Sr, Mn, Fe, Ti, Se, V, As, Cu и др. [Моисеенко и др., 2006].

По результатам анализа главных компонент для района г. Мончегорска выявлено две группы металлов, содержание которых находится во взаимосвязи (рис. 2, в). Первая группа объединяет в себе ряд металлов (Al, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb и As), а также наблюдаемое повышение Eh и снижение pH. Предположительно, данная группа образовалась при техногенном влиянии Мончегорского участка Кольской ГМК, выбросы которого содержат Cu, Ni, Pb, Cd, Fe, Co, Zn и Cr [Даувальтер, Кашулин, 2016; Денисов и др., 2018; Denisov et al., 2020]. Вторая группа состоит из V, Sr и Mg. Оставшиеся не сгруппированные металлы имеют смешанное происхождение.

Проведенный многофакторный анализ для района г. Оленегорска позволил выделить две группы элементов (рис. 2, г). К первой группе относятся Ni, Ba, Sr и Mg, а также связанное с ними повышение содержания вод. Наиболее вероятно, данная группа сформировалась при влиянии неочищенных промышленных стоков Оленегорского ГОКа «Олкон». По литературным источникам, в озерах, принимающих сточные воды с железорудного

Таблица 3. Индексы качества воды и риска для здоровья населения (минимальные, максимальные и средние значения)

Table 3. Indices of water quality and risk to public health (minimum, maximum and average values)

Район отбора Sampling area	HMEI	HMTI	HI	CR, 10 <sup>-4</sup>
<b>L-1</b> – Южные фоновые территории / Southern background territories	<u>(0,37 – 4,22)</u> <b>1,10</b>	<u>(22,6 – 198)</u> <b>46,1</b>	<u>(0,40 – 6,10)</u> <b>1,09</b>	<u>(0,9 – 3,5)</u> <b>1,7</b>
<b>L-2</b> – район г. Ковдора / Kovdor area	<u>(0,46 – 1,87)</u> <b>1,02</b>	<u>(43,4 – 179)</u> <b>105</b>	<u>(0,31 – 2,66)</u> <b>0,97</b>	<u>(2,0 – 12,3)</u> <b>5,5</b>
<b>L-3</b> – район г. Кировска / Kirovsk area	<u>(0,28 – 1,71)</u> <b>0,87</b>	<u>(17,7 – 154)</u> <b>69,7</b>	<u>(0,47 – 4,99)</u> <b>2,08</b>	<u>(0,8 – 5,0)</u> <b>2,7</b>
<b>L-4</b> – район г. Апатиты / Apatity area	<u>(0,35 – 9,28)</u> <b>2,22</b>	<u>(16,9 – 1193)</u> <b>246</b>	<u>(0,30 – 19,6)</u> <b>4,90</b>	<u>(1,5 – 19,8)</u> <b>5,7</b>
<b>L-5</b> – район г. Мончегорска / Monchegorsk area	<u>(0,93 – 179)</u> <b>22,7</b>	<u>(37,7 – 5595)</u> <b>671</b>	<u>(0,44 – 31,8)</u> <b>3,31</b>	<u>(6,0 – 1599)</u> <b>203</b>
<b>L-6</b> – район г. Оленегорска / Olenegorsk area	<u>(0,74 – 26,0)</u> <b>3,94</b>	<u>(35,5 – 1665)</u> <b>241</b>	<u>(0,31 – 49,8)</u> <b>4,52</b>	<u>(2,4 – 22,4)</u> <b>7,8</b>
<b>L-7</b> – район п. Ревда / Revda area	<u>(0,25 – 6,62)</u> <b>1,38</b>	<u>(19,0 – 648)</u> <b>121</b>	<u>(0,36 – 21,5)</u> <b>3,29</b>	<u>(0,2 – 4,4)</u> <b>1,3</b>
<b>L-8</b> – район с. Ловозеро / Lovozero area	<u>(2,67 – 6,63)</u> <b>4,10</b>	<u>(81 – 352)</u> <b>158</b>	<u>(0,75 – 6,74)</u> <b>2,10</b>	<u>(0,9 – 6,7)</u> <b>3,6</b>
<b>L-9</b> – Северные фоновые территории / Northern background territories	<u>(0,32 – 1,52)</u> <b>0,87</b>	<u>(12,0 – 96,5)</u> <b>44,3</b>	<u>(0,14 – 1,32)</u> <b>0,75</b>	<u>(1,6 – 3,5)</u> <b>2,2</b>

производства «Олкон», наблюдаются повышенные значения Ni, Co, Sr, Cu и Al, ионов Mg, а также повышенная минерализация [Даувальтер, 2019]. Вторая группа объединяет в себе Mn, Cu, Cd, Fe, и, возможно, источником поступления данных металлов являются атмосферные выпадения Оленегорского ГОКа.

*Показатели качества поверхностных вод и опасность металлов для здоровья*

Концентрации металлов не всегда отражают уровень загрязнения вод. При расчете индексов загрязнения (табл. 3) можно получить более убедительную оценку состояния водоемов, поскольку каждый металл рассматривается в соответствии с его токсичностью, а также с общей нагрузкой загрязнения.

Индекс HMEI рассчитывается на основе суммы отношений измеренных концентраций металлов к их ПДК. Водоемы Северных фоновых территорий (L-9) в общем можно отнести к чистым, тогда как воды Южных фоновых территорий, за счет повышенного природного содержания Fe, классифицируются как слегка загрязненные. На уровне фоновых значений индекса находятся воды в районах Ковдора (L-2) и Кировска (L-3), где основными влияющими на индекс металлами являются Ni (для L-2) и Al (для L-3). Слегка загрязненной является вода в районе п. Ревда (L-7), на индекс которой повлияли концентрации Al и Fe. Водоемы в районах Апатитов (L-4) и Оленегорска (L-6) относятся к классу умеренно загрязненных за счет Al и Ni (для L-4) и Fe, Al и Ni (для L-6). Более загрязненными являются водоемы в районе с. Ловозеро, воды которых относятся к классу сильно загрязненных за счет высокого природного содержания Fe. Наиболее загрязненное озеро с HMEI = 179 обнаружено в районе г. Мончегорска (L-5), и в среднем воды в районе L-5 классифицируются как серьезно загрязненные за счет Ni.

Индекс HMTL оценивает уровень металлов в природных водах, влияющий на здоровье человека [Kumar et al., 2019]. Согласно полученным результатам, низкой токсичностью обладают воды Северных (L-1) и Южных (L-9) фоновых территорий, а также района г. Кировска (L-3). Водные объекты районов г. Ковдора (L-2), п. Ревда (L-7) и с. Ловозеро (L-8) характеризуются умеренной токсичностью за счет содержания Ba, Ni, Al для L-2, Al и Mn для L-7 и L-8. Средняя умеренная токсичность вод, обоснованная содержанием Al, Mn, Ni, Ba, определена для Апатитов (L-4) и Оленегорска (L-6), притом

для отдельных водных объектов показана чрезвычайно высокая токсичность (р. Белая, озеро в районе хвостохранилища, оз. Пермус). Очень высокая токсичность определена для г. Мончегорска (L-5), где максимальные значения индекса для озер на территории химической деградации растительности составляют 5077 и 5595 соответственно за счет Ni, Cu, Al, Mn, Co и Ba в воде.

Оценка потенциальных неканцерогенных рисков для здоровья человека показала, что для Северных фоновых территорий, а также для района г. Ковдора значение индекса HI равно или ниже порогового значения для питьевой воды. Для остальных районов в среднем вода непригодна для употребления внутрь, однако в каждой локации присутствуют от 27 до 81 % водоемов с низким риском возникновения неканцерогенных эффектов при указанном употреблении ( $HI_{ing} < 1$ ). В районах L-4, L-5, L-6 и L-7 присутствуют водоемы с  $HI_{derm} > 1$ , и, следовательно, при воздействии воды через кожу возможен высокий риск возникновения неканцерогенных эффектов. Наиболее высокие неканцерогенные риски могут возникнуть при потреблении воды из водоемов у хвостохранилищ.

Риск рака представляет собой возможность развития любого типа онкологии на протяжении всей жизни из-за воздействия канцерогенов [Li et al., 2014]. Данный индекс риска разработан для перорального и кожного контакта с Ni, As, Cd, Cr и Pb. Рассмотрение значений индекса CR (табл. 3) при употреблении воды внутрь позволило определить, что 92 % вод из рек и озер Кольского полуострова имеют значения индекса выше приемлемого уровня. В настоящем исследовании наибольший вклад в данный показатель вносят высокие концентрации Ni, вследствие этого в районе г. Мончегорска (L-5) установлены наивысшие показатели CR. Расчет возникновения канцерогенных эффектов при воздействии воды через кожу показал, что вода в озерах на территории химического выгорания растительности (район L-5) обладает канцерогенным действием и в этом случае.

Расчет нескольких индексов загрязнения для одной и той же территории привел к разным статусам ее загрязнения. Так, водные объекты в с. Ловозеро считаются сильно загрязненными согласно HMEI, в то же время согласно HMTL они оцениваются как водоемы с умеренной токсичностью. Однако статусы загрязнения совпадают, когда водный объект испытывает сильную антропогенную нагрузку (район г. Мончегорска).

## Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что горнодобывающая промышленность – один из самых мощных факторов антропогенной нагрузки на природные поверхностные воды Кольского полуострова. Отмечены водоемы с экстремально высоким (до 10 ед.) и низким (3,7 ед.) рН, с низкими значениями Eh поверхностных вод (до –180 мВ), а также с высоким содержанием (до 3300 мг/л). Анализ методом атомно-абсорбционной спектроскопии показал, что основными металлами, загрязняющими воды Кольского полуострова, являются (мкг/л): Cu (до 2350), Ni (до 3420), Co (до 53), Pb (до 8,8), Cd (до 0,745), Mn (до 947), Sr (до 3080), Al (до 2120) и Fe (до 3970). Проведенный статистический анализ позволил предположить основные источники загрязнения наиболее подверженных антропогенному воздействию водоемов Кольского полуострова. Отмечена высокая токсичность загрязняющих металлов, значительный риск возникновения неканцерогенных и канцерогенных эффектов при потреблении воды. Установлено, что наиболее загрязненные токсичными металлами поверхностные воды находятся в районе г. Мончегорска, однако также следует обратить внимание на районы г. Апатиты и г. Оленегорска.

Авторы благодарят Д. С. Косякова и А. Ю. Кожевникова за возможность использования оборудования ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета.

## Литература

- Даувальтер В. А. Гидрохимия озер в зоне влияния стоков производства железорудного сырья // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 167–176. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-167-176
- Даувальтер В. А., Даувальтер М. В. Экологическое состояние подземных вод Восточного рудника АО «Апатит» // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. Т. 16. С. 131–135. doi: 10.31241/FNS.2019.16.027
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: В 3 ч. Ч. 2. Гидрохимия водоемов. Мурманск: МГТУ, 2014. 222 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Влияние деятельности горно-металлургических предприятий на химический состав донных отложений озера Имандра, Мурманская область // Биосфера. 2015. Т. 7, № 3. С. 295–314. doi: 10.24855/biosfera.v7i3.86
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Оценка экологического состояния озера Имандра по результатам исследований химического состава донных отложений // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Мат-лы VI Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Апатиты, 10–14 октября 2016 г.). Апатиты, 2016. С. 180–185.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Аккумуляция и миграция химических элементов в арктических наземных и водных экосистемах в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель» // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 31–42. doi: 10.17076/lim744
- Денисов Д. Б., Валькова С. А., Терентьев П. М., Черепанов А. А., Разумовская А. В. Экологическая характеристика малых озер в зоне деятельности Мончегорской площадки АО «Кольская ГМК» // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 65–76. doi: 10.17076/lim845
- Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник / Под ред. М. М. Трофимчук. Ростов-на-Дону, 2020. 578 с.
- Кашулин Н. А., Беккелунд А. А., Даувальтер В. А., Петрова О. В. Апатитовое горно-обогатительное производство и эвтрофирование арктического озера Имандра // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3(35). С. 16–34. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34
- М 03-505-119-03. Методика количественного химического анализа. Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом. СПб., 2003.
- Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
- Югай В. С., Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Содержание биодоступных форм соединений металлов в донных отложениях водоемов и коэффициент накопления (Kd) как показатели экологической обстановки водоемов (на примере озер Мурманской области) // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 591–600.
- Chowdhury S., Mazumder M. A., Alattas O., Husain T. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries // Sci. Total Environ. 2016. Vol. 569-570. P. 476–488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.166
- Dauvalter V. A., Dauvalter M. V., Slukovskii Z. I. The dynamics of the chemical composition of surface water in the zone of influence of North-West Phosphorous Company JSC. 5th International Conference 'Arctic: History and Modernity' // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 539. Art. 012026. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012026
- Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small lakes ecosystems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk Region) // Environments. 2020. Vol. 7, no. 4. P. 29. doi: 10.3390/environments7040029
- Evshev A. V., Krasovskaya T. M. Toxic metals in soils of the Russian North // J. Geochem. Explor. 2017. Vol. 174. P. 128–131. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018
- Haque A., Jewel A. S., Hasan J., Islam M., Ahmed S., Alam L. Seasonal variation and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface waters of the Ganges river (northwestern Bangladesh) // Mal. J. Analyt. Sci. 2019. Vol. 23, no. 2. P. 300–311. doi: 10.17576/mjas-2019-2302-14

Huffmeyer N., Klasmeier J., Matthies M. Geo-referenced modeling of zinc concentrations in the Ruhr river basin (Germany) using the model GREAT-ER // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407. P. 2296–305. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.11.055

Ji H., Li H., Zhang Y., Ding H., Gao Y., Xing Y. Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of yongding river in a coal mine brownfield // *J. Soil. Sedim.* 2018. Vol. 18, no. 2. P. 624–639. doi: 10.1007/s11368-017-1833-y

Kumar V., Parihar D. R., Sharma A., Bakshi P., Preet Singh Sidhu G., Shreeya Bali S., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A. K., Gyasi-Agyei Y., Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses // *Chemosphere.* 2019. Vol. 236. Art. 124364. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364

Li Z., Ma Z., van der Kuijp T. J., Yuan Z., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2014. Vol. 468–469. P. 843–853. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090

Mazukhina S. I., Sandimirov S. S., Pozhilenko V. I., Gudkov A. V. The genesis of the natural water chemistry in the South-Western Khibiny Mountains (the Malaya Belaya River Basin) // *J. Environ. Sci. Heal. Part A.* 2020. Vol. 55, no. 5. P. 511–516. doi: 10.1080/10934529.2019.1710086

Moiseenko T. I., Morgunov B. A., Gashkina N. A., Megorskiy V. V., Pesiakova A. A. Ecosystem and human health assessment in relation to aquatic environment pollution by heavy metals: case study of the Murmansk Region, northwest of the Kola Peninsula, Russia // *Environ. Res. Lett.* 2018. Vol. 13, no. 6. Art. 065005. doi: 10.1088/1748-9326/aab5d2

Naymushina O., Shvartsev S., Ses K. Hydrochemistry and composition of hydrocarbons in the waters of peatlands in Western Siberia // *IERI Procedia.* 2014. Vol. 8. P. 119–124. doi: 10.1016/j.ieri.2014.09.020

Saha P., Paul B. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique // *Hum. Ecol. Risk Assess: Inter. J.* 2019. Vol. 25, no. 4. P. 966–987. doi: 10.1080/10807039.2018.1458595

Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment // *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology / A. Luch (Ed.); Experientia Supplementum.* 2012. Vol. 101. P. 133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4\_6

Zakir H. M., Sharmin S., Akter A., Rahmana S. Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: A case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh // *Environ. Adv.* 2020. Vol. 2. Art. 100005. doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005

## References

Chowdhury S., Mazumder M. A., Alattas O., Husain T. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Sci. Total Environ.* 2016;569-570:476–488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.166

Dauvalter V. A. Lakes hydrochemistry in the zone of influence of iron-mining industry waste waters. *Vestnik of MSTU.* 2019;22(1):167–176. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-167-176 (In Russ.)

Dauvalter V. A., Dauvalter M. V. Ecological conditions of underground waters of the Vostochny mine of the Apatit JSC. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTS RAN = Proceedings of the Fersman Scientific Session, Geological Institute KSC RAS.* 2019;16:131–135. doi: 10.31241/FNS.2019.16.027 (In Russ.)

Dauvalter V. A., Dauvalter M. V., Slukovskii Z. I. The dynamics of the chemical composition of surface water in the zone of influence of North-West Phosphorous Company JSC. 5<sup>th</sup> International Conference 'Arctic: History and Modernity'. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020;539:012026. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012026

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Geoecology of the lakes in the Murmansk Region. Part. 2. Hydrochemistry of reservoirs. Murmansk: MGTU; 2014. 222 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. The influence of mining and metallurgical enterprises on the chemical composition of Lake Imandra, Murmansk Region. *Biosfera = Biosphere.* 2015;7(3):295–314. doi: 10.24855/biosfera.v7i3.86 (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Assessment of the ecological state of Lake Imandra based on the results of studies of the chemical composition of bottom sediments. *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniya = Environmental problems of the northern regions and ways to solve them: Proceed. of the VI All-Russian scientific conference with int. participation (Apatity, October 10-14, 2016).* Apatity; 2016. P. 180–185. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Accumulation and migration of chemical elements in the Arctic terrestrial and aquatic ecosystems in the impact zone of emissions from the Pechenganickel company. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;3:31–42. doi: 10.17076/lim744 (In Russ.)

Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small lakes ecosystems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk Region). *Environments.* 2020. Vol. 7, no. 4. P. 29. doi: 10.3390/environments7040029

Denisov D. B., Valkova S. A., Terentiev P. M., Cherepanov A. A., Razumovskaya A. V. Ecological state of small lakes in the impact zone of the Monchegorsk site of JSC 'Kolskaya GMK'. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;9:65–76. doi: 10.17076/lim845 (In Russ.)

Evseev A. V., Krasovskaya T. M. Toxic metals in soils of the Russian North. *J. Geochem. Explor.* 2017;174:128–131. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018

Haque A., Jewel A. S., Hasan J., Islam M., Ahmed S., Alam L. Seasonal variation and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface waters of the Ganges river (northwestern Bangladesh). *Mal. J. Analyt. Sci.* 2019;23(2):300–311. doi: 10.17576/mjas-2019-2302-14

Huffmeyer N., Klasmeier J., Matthies M. Geo-referenced modeling of zinc concentrations in the Ruhr

river basin (Germany) using the model GREAT-ER. *Sci. Total Environ.* 2009;407:2296–305. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.11.055

Ji H., Li H., Zhang Y., Ding H., Gao Y., Xing Y. Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of yongding river in a coal mine brownfield. *J. Soil. Sedim.* 2018;18(2):624–639. doi: 10.1007/s11368-017-1833-y

Kashulin N. A., Bekkelund A. A., Dauvalter V. A., Petrova O. V. Apatite mining and processing production and eutrophication of the Arctic Lake Imandra. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2019;3(35):16–34. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34 (In Russ.)

Kumar V., Parihar D. R., Sharma A., Bakshi P., Preet Singh Sidhu G., Shreeya Bali S., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A. K., Gyasi-Agyei Y., Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere.* 2019;236:124364. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364

Li Z., Ma Z., van der Kuijp T. J., Yuan Z., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Sci. Tot. Environ.* 2014;468–469:843–853. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090

M 03-505-119-03. Methods of quantitative chemical analysis. Determination of metals in drinking, mineral, natural, waste water and atmospheric precipitation by the atomic absorption method. St. Petersburg; 2003.

Mazukhina S. I., Sandimirov S. S., Pozhilenko V. I., Gudkov A. V. The genesis of the natural water chemistry in the South-Western Khibiny Mountains (the Malaya Belaya River Basin). *J. Environ. Sci. Heal. Part A.* 2020;55(5):511–516. doi: 10.1080/10934529.2019.1710086

Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Gashkina N. A. Dispersed elements in surface waters of land: Techno-

philicity, bioaccumulation, and ecotoxicology. Moscow: Nauka; 2006. 261 p. (In Russ.)

Moiseenko T. I., Morgunov B. A., Gashkina N. A., Megorskiy V. V., Pesiakova A. A. Ecosystem and human health assessment in relation to aquatic environment pollution by heavy metals: Case study of the Murmansk Region, northwest of the Kola Peninsula, Russia. *Environ. Res. Lett.* 2018;13(6):065005. doi: 10.1088/1748-9326/aab5d2

Naymushina O., Shvartsev S., Ses K. Hydrochemistry and composition of hydrocarbons in the waters of peatlands in Western Siberia. *IERI Procedia.* 2014;8:119–124. doi: 10.1016/j.ieri.2014.09.020

Saha P., Paul B. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique. *Hum. Ecol. Risk Asses: Inter. J.* 2019;25(4):966–987. doi: 10.1080/10807039.2018.1458595

Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment. A. Luch (ed.) *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. Experientia Supplementum.* 2012;101:133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4\_6

Trofimchuk M. M. (ed.). The quality of surface waters in the Russian Federation. The yearbook. Rostov-on-Don; 2020. 578 p. (In Russ.)

Yugai V. S., Dauvalter V. A., Kashulin N. A. The content of bioavailable forms of metal compounds in bottom sediments of water bodies and the accumulation coefficient (Kd) as indicators of the ecological situation of water bodies (for example, lakes in the Murmansk Region). *Vestnik MSTU.* 2013;16(3):591–600. (In Russ.)

Zakir H. M., Sharmin S., Akter A., Rahmana S. Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: A case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh. *Environ. Adv.* 2020;2:100005. doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005

Поступила в редакцию / received: 31.05.2022; принята к публикации / accepted: 30.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Яковлев Евгений Юрьевич

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией экологической радиологии, ведущий научный сотрудник

e-mail: evgeny.yakovlev@fciactic.ru

### Дружинина Анна Сергеевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

e-mail: annadruzhinina27@yandex.ru

### Дружинин Сергей Валериевич

научный сотрудник

e-mail: druzhininserg@yandex.ru

### Иванченко Николай Леонидович

канд. хим. наук, научный сотрудник

e-mail: ivanchenkonl@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Yakovlev, Evgeny

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Leading Researcher

### Druzhinina, Anna

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

### Druzhinin, Sergey

Researcher

### Ivanchenko, Nikolai

Cand. Sci. (Chem.), Researcher