

ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 504.4.054

doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.2.3-13

СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРНО-ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ПРИМЕРЕ ООО «ЛОВОЗЕРСКИЙ ГОК»

Красавцева Е. А., Сандимиров С. С.

STATE OF WATER BODIES IN THE AREA OF INFLUENCE OF MINING AND PROCESSING ENTERPRISES (CASE STUDY OF LOVOZERSKY MINING AND PROCESSING PLANT)

Krasavtseva E. A., Sandimirov S. S.

Аннотация

Введение. Впервые проведено расширенное исследование химического состава поверхностных вод и донных отложений озер, в различной степени подверженных влиянию горнорудного комплекса ООО «Ловозерский ГОК» (пгт Ревда, Мурманская обл.), осуществляющего добычу и переработку редкометалльных руд. **Методы.** В работе использованы данные, полученные в ходе исследований 1995–2005 гг. и 2019–2020 гг. Пробы воды и донных отложений анализировались различными методами. Валовые содержания элементов в донных отложениях сравнивались с фоновыми, а при их отсутствии — с кларковыми содержаниями элементов в земной коре. Для оценки уровня загрязнения реки Сергевань, принимающей стоки предприятия, рассчитан коэффициент предельной загрязненности. **Результаты.** Установлено, что за последние 35 лет химический состав поверхностных вод близлежащих водоемов претерпел небольшие изменения. Значительных превышений предельно допустимых концентраций для водных объектов рыбохозяйственного значения не обнаружено. В то же время сопоставление содержания тяжелых металлов в донных отложениях, отобранных из озер Ильма и Кривое, с фоновыми выявило загрязнение первого стронцием, цинком и марганцем. Также отмечено многократное превышение содержания редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd), Nb и Ta в донных отложениях оз. Ильма в сравнении с оз. Кривое. Анализ проб речных вод, отобранных на разном удалении до и после места сброса сточных вод предприятием, подтвердил предположение о загрязнении р. Сергевань сточными водами предприятия. **Заключение.** На загрязнение водных объектов большее влияние оказывают сбрасываемые сточные воды горнорудного предприятия, однако повышенное содержание редкоземельных элементов в донных отложениях оз. Ильма может являться следствием аэротехногенного переноса частиц хвостов обогащения лопаритовых руд, вкладом дренажных вод хвостохранилищ либо выщелачиванием подстилающих пород.

Ключевые слова: поверхностные воды, донные отложения, загрязняющие вещества, сточные воды, редкоземельные элементы.

Abstract

Introduction. This extended study is the first to analyze the chemical composition of the surface waters and bottom sediments of the lakes affected to various extents by Lovozersky Mining and Processing Plant (Revda urban settlement, Murmansk Region) performing mining and processing of rare metal ores. **Methods.** During the study, we used data obtained in the course of research in 1995–2005 and 2019–2020. Water and bottom sediment samples were analyzed using various methods. The total contents of elements in the bottom sediments were compared with the background values or, in their absence, with the clarke contents of elements in the Earth's crust. To assess the level of pollution in the Sergevan River receiving wastewater from the plant, the maximum pollution index was calculated. **Results.** Over the past 35 years, the chemical composition of the surface waters of nearby water bodies underwent minor changes. No significant excess of maximum permissible concentrations for fishery water bodies was found. The comparison of the contents of heavy metals in the bottom sediments collected from Lakes Ilma and Krivoeye with the background values revealed contamination of the Lake Ilma with strontium, zinc and manganese. Besides, a multiple excess of the content of rare earth elements (La, Ce, Pr, Nd), Nb and Ta was established in the bottom sediments of Lake Ilma in comparison with that in Lake Krivoeye. The analysis of the river water samples taken at different distances upstream and downstream the site of wastewater discharge confirmed the assumption about the pollution of the Sergevan River by wastewater from the plant. **Conclusion.** The pollution of the water bodies is mainly caused by wastewater discharged from the plant, however, the increased content of rare earth elements in the bottom sediments of Lake Ilma may be due to air transport of particles of loparite ore concentration tailings, drainage from tailing dams, or degradation of underlying rocks. **Keywords:** surface waters, bottom sediments, pollutants, wastewater, rare earth elements.

Введение

На территории Мурманской области расположено несколько крупных горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятий: АО «Апатит», АО «Кольская ГМК», АО «Олкон» и др. Горнопромышленными предприятиями региона, по данным за 2019 год¹, сброшено 1442,53 млн м³ сточных вод. В разное время сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН и СПбГУ проводились исследования водных объектов в зоне влияния предприятий горнопромышленного комплекса [7, 14, 17, 20, 21].

Актуальность подобных работ, с одной стороны, обусловлена уязвимостью водных объектов Арктической зоны РФ (АЗРФ) и влиянием на них выбросов промышленных предприятий и больших объемов сточных вод со сложным химическим составом. Происходят существенные перестройки водных экосистем внутренних водоемов АЗРФ, которые интегрируют все изменения окружающей среды, происходящие на территории их водосборов, и аккумулируют большую часть попавших на территорию водосборов загрязняющих веществ [7].

С другой стороны, современные изменения арктического климата в сторону потепления актуализируют исследовательский интерес к анализу исторического развития водных экосистем. Потепление климата выступает одним из модуляторов антропогенно обусловленных процессов загрязнения и эвтрофирования пресноводных экосистем в местах интенсивного природопользования Арктической зоны [11]. Также в озерах АЗРФ наблюдаются нарушения продукционных процессов гидробионтов, уменьшение видового разнообразия на фоне загрязнения окружающей среды и изменений климата [22].

Горнорудное предприятие «Ловозерский ГОК» приурочено к месторождению в Ловозерских тундрах редкометалльных руд цериевой группы, ниобия и тантала. На руднике «Карнасурт» производится добыча и обогащение руды с получением лопаритового и эвдиалитового концентратов [18]. Предприятие ежегодно сбрасывает свыше 8 млн м³ сточных вод в р. Сергевань, являющуюся притоком оз. Ловозеро¹. По резуль-

¹ Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 г. [online]. Доступно по ссылке: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate> [дата обращения: 15.11.2020].

татам гидрохимических наблюдений в зоне влияния предприятий Ловозерского района были отмечены превышения предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) по молибдену, меди, марганцу, фтору (р. Сергевань); марганцу и железу общему (р. Вирма); меди (оз. Ловозеро).

Цель исследования — изучить химический состав озер и рек, расположенных в зоне влияния горнодобывающего предприятия. Оценка уровня загрязнения поверхностных вод озер как чувствительного индикатора интенсивности техногенной нагрузки позволяет получать представление о текущем состоянии экосистемы.

Методы и материалы

Краткое описание района исследований

Ловозерский щелочной массив представляет многофазовую интрузию центрального типа палеозойского возраста, прорывающую породы архейского фундамента (гнейсы различного состава) и содержит верхнедевонские эффузивно-осадочные образования (пикритовые порфириды, базальты, трахибазальты и их туфы, сланцы, песчаники, кварциты). Массив сложен щелочными породами трех комплексов лопаритоносного, эвдиалитовых луявритов и жильных пород [15]. В состав разрабатываемых руд также входят апатит и виллиомит (водорастворимый NaF), что обуславливает повышенное содержание фтор- и фосфат-ионов в сточных водах предприятия.

Реки на территории района исследования относятся к группе малых горных рек, стекающих с горных возвышенностей, впадают в озера Умбозеро и Ловозеро². Ширина их незначительна — до 5 м, глубина на порогах и перекатах 0,1–0,8 м, на плесах — до 3 м, скорость течения 0,2–0,7 м/с, на порогах — до 2,7 м/с. Русла рек извилистые порожистые, дно каменистое, местами скальное. Берега преимущественно крутые, иногда обрывистые, высотой до 1 м. Наиболее крупными реками, протекающими по исследуемой территории, являются Сергевань (34,5 км), Светлая (18,8 км) — впадают в оз. Ловозеро, Шомийок (12,1 км) — впадает в оз. Сикир, Аллуйв (6,5 км), Азимут (8,7 км), Сенгисьявр (9,2 км), Тавайок (11,7 км) — впадают в оз. Умбозеро. В верхнем течении характеризуются бурным потоком и многочисленными порогами, в ниж-

² Атлас Мурманской области (1971). Мурманск, 33 с.

нем — протекают по лесным и заболоченным массивам. На всем протяжении принимают многочисленные притоки. Краткая характеристика озер района исследования приведена в табл. 1.

Техногенными отходами комплекса «Карнасурт», влияющими на качество поверхностных вод, являются хвосты обогатительной фабрики (ОФ) и порода от проходческих и вскрышных работ. В открытые водоемы также сбрасываются шахтные и дренажные воды хвостохранилища и промышленные стоки ОФ.

Объекты и методы исследований

В работе использованы данные, полученные в ходе наблюдений за гидрохимическим режимом поверхностных вод Ловозерского района в 80-х годах XX века сотрудниками Кольского филиала Академии наук СССР, а также в результате анализа отобранных проб воды озер Ильма, Кривое, Сикир, Ревдозеро, Ловозеро и донных отложений (ДО) из озер Ильма и Кривое, исследованных сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН в 90-х годах XX века, 2019 и 2020 гг. (рис. 1).

С целью установления негативного влияния предприятия на загрязнение р. Сергевань сбрасываемыми сточными водами летом 2020 г. был проведен отбор проб из рек Раслака и Сергевань до и после выпуска сточных вод.

Аналитические методы, включающие химический анализ компонентов и их первичную подготовку, применялись по стандартным сертифицированным методикам выполнения измерений. Пробы воды из озер и рек анализировали различными методами: потенциометрическим (фториды), ионообменной хроматографии (сульфаты и хлориды), атомно-абсорбционной спектрометрии (катионы), колориметрическим (фосфаты). Методом масс-спектрометрии с индуктивно

связанной плазмой (ИСП-МС, средство измерения — ELAN 9000 (PerkinElmer, США)) определены концентрации микроэлементов в ДО.

Сравнение содержания тяжелых металлов (ТМ) в ДО проводили относительно фоновых в ДО малых озер Кольского полуострова [9, 12], а при их отсутствии — кларков в земной коре [3]. Также результаты анализа проб воды озер и рек сравнивались с ПДК_{рх}³.

Для оценки уровня загрязнения реки Сергевань сточными водами предприятия использована методика оценки качества воды по коэффициенту предельной загрязненности (K_{ПЗ}), предложенная В. В. Шабановым [19]. Показатель предельной загрязненности в безразмерном виде рассчитывается по формуле

$$K_{ПЗ} = \frac{1}{N} \sum \frac{C_i}{ПДК_i} - 1,$$

где C_i — концентрация загрязняющего воду вещества; ПДК_i — предельно допустимая концентрация i-го вещества; N — количество i-х веществ, используемых для оценки. Связь K_{ПЗ} с широко применяемым в отечественной и зарубежной практике индексом загрязнения воды (ИЗВ = K_{ПЗ}+1) позволяет оценить качество воды по классификационной шкале.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты анализов и перечень определяемых компонентов приведены в табл. 2–5. За последние 35 лет в процессе деятельности горнорудного предприятия химический состав

³ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203) [online]. Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/420389120> [дата обращения: 15.11.2020].

Таблица 1

Морфометрические показатели исследуемых озер

Озеро	Высота над уровнем моря, м	Наибольшая длина, км	Наибольшая ширина, км	Площадь озера, км ²	Площадь водосбора, км ²	Период исследований, гг.
Ильма*	399	0,8	0,46	0,27	6,26	1984–1996, 2019, 2020
Кривое*	199,5	1,58	0,73	0,47	16,2	1995–2005, 2019
Ревдозеро*	196,5	4,56	2,36	7	53,6	1995–2005, 2019
Сикир*	178,8	5,97	2,57	8,62	230,5	2019
Ловозеро**	153,9	44,5	8,64	224,5	3770	2004, 2019

Примечание: * — по данным⁴; ** — по данным из [2].

⁴ Каталог озер Мурманской области (1962). (Под ред. Ф. И. Быдина). М.; Л.: Изд-во АН СССР. 146 с.

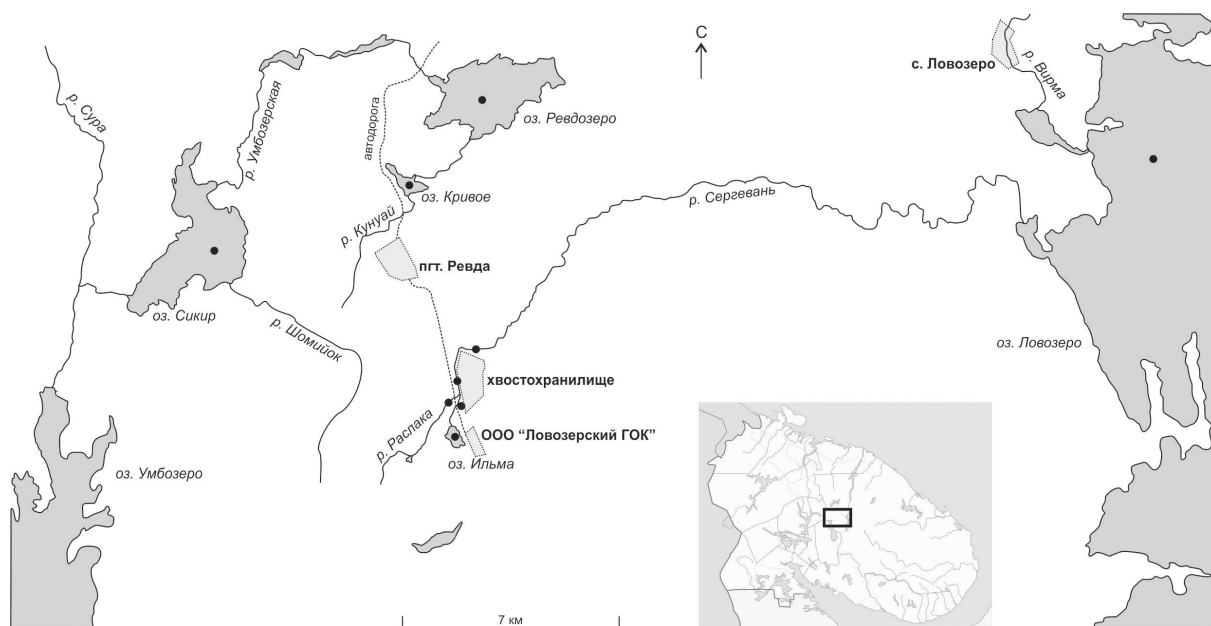


Рис. 1. Схема отбора проб поверхностных вод и ДО озер

поверхностных вод близлежащих озер постепенно менялся. Наблюдается снижение водородного показателя воды, в частности, с 7,5 до 6,9 для оз. Ильма, расположенного на минимальном удалении (100 м) от предприятия (табл. 2). Вместе с тем, для этого озера отмечается снижение минерализации почти в два раза — с 46 до 25 мг/л, как и для озер Кривое и Ревдозеро, расположенных на север от предприятия рядом с пгт Ревда. От-

дельно стоит отметить увеличение минерализации более крупного оз. Ловозеро, принимающего стоки р. Сергевань.

Ловозеро является третьим по величине озером Кольского полуострова, относится к высшей категории водоемов рыбохозяйственного значения.

Все озера относятся к ультрапресным, низкоминерализованным — по И. В. Баранову [1],

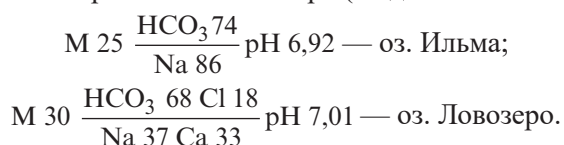
Таблица 2

Содержание главных ионов в воде исследуемых озер, мг/л

Озеро	Год	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	ΣM*
Ильма	1984	7,50	0,80	0,70	12,20	0,80	24,4	6,50	1,00	46,4
	1995	7,15	0,86	0,17	9,31	0,87	19,9	4,42	1,28	36,8
	1996	6,61	0,63	0,10	7,92	0,96	17,0	2,21	1,51	30,3
	2019	6,88	0,46	0,08	8,58	0,68	14,40	2,67	1,08	27,95
	2020	6,92	0,45	0,10	6,95	0,76	13,36	2,26	1,10	24,98
Кривое	1995	7,30	5,65	2,26	12,00	2,65	39,0	8,3	7,6	77,4
	2000	7,34	5,85	2,35	10,35	2,50	42,3	6,4	6,0	75,8
	2005	6,94	4,96	2,00	10,20	2,27	38,8	5,5	5,6	69,3
	2019	6,77	5,54	1,92	10,46	2,46	36,31	6,92	4,19	67,80
Ревдозеро	1995	7,08	3,48	1,32	8,75	2,12	26,2	5,0	6,2	53,1
	2000	7,10	3,05	1,35	7,67	1,76	24,0	3,6	5,6	47,0
	2005	6,60	3,65	1,40	8,52	2,39	38,1	3,9	5,2	63,1
	2019	6,52	3,54	1,37	8,58	2,10	26,42	4,50	4,04	50,55
Сикир	2019	6,79	2,22	0,96	5,31	1,14	14,58	3,33	2,23	29,77
Ловозеро	2004	7,09	1,24	0,51	4,68	0,75	13,2	1,6	1,3	23,3
	2019	7,01	3,01	1,48	3,82	0,54	16,17	2,63	2,54	30,19

Примечание: * — минерализация воды, мг/л.

сумма солей не превышает 100 мг/л. По кислотно-щелочным условиям рассматриваемые озера относятся к нейтральным. Для природных вод Кольского Севера, а также озер, расположенных на востоке и юго-востоке Кольского полуострова, типичен следующий порядок распределения главных ионов: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$. Состав воды отобранных проб соответствует природному распределению и позволяет отнести их к классу гидрокарбонатных вод. Ниже приведены формулы ионно-солевого состава озер Ильма и Ловозеро (по данным 2019 г.):



Озеро Ильма — гидрокарбонатное, по катионному составу — натриевое. Озеро Ловозеро — гидрокарбонатно-хлоридное, натриево-кальциевое.

Анализ проб воды, отобранных в 2019 г. из озер в районе исследований, на содержание загрязняющих веществ выявил незначительное превышение ПДК_{рх} ионов меди (3 ПДК) и фтора (1,1 ПДК) в оз. Сикир (табл. 3). В начале века повышенные содержания железа были установлены в пробах воды озер Кривое и Ревдозеро.

Большой интерес представляют исследования озер Ловозеро и Ильма. Озеро Ловозеро является третьим по величине озером Кольского полуострова, относится к высшей категории водоемов рыбохозяйственного значения. Сточные воды предприятия поступают в озеро по реке Сергевань. В пробах воды, отобранных в 2019 г. из оз. Ловозеро, отмечены повышенные содержания железа (до 7 ПДК), ранее, в 2004 г., были выявлены превышения по марганцу (1,4 ПДК) и железу (1,4 ПДК).

Ранее в работах, посвященных исследованиям материала хвостов обогащения лопаритовых руд [5, 6], на основе анализа гранулометрического состава и инженерно-геологических характеристик были сделаны выводы о вероятности пыления незакрепленных участков полей хвостохранилищ. В пробах, отобранных из оз. Ильма, расположенном ближе остальных к предприятию, выявлены повышенные содержания алюминия (4 ПДК), фтора (1,7 ПДК), фосфатов (1,3 ПДК) и марганца (1,2 ПДК). Данные элементы входят в состав минералов, слагающих хвосты обогащения перерабатываемых руд: нефелина (Na,K)AlSiO₄, полевых шпатов (Na,K)AlSi₃O₈, эгирина NaFe₃+(Si₂O₆), апатита Ca₁₀(PO₄)₆(OH,F,Cl)₂ и др.

Повышенные концентрации железа, алюминия и марганца в поверхностных водах АЗРФ

Таблица 3

Содержание загрязняющих веществ в воде исследуемых озер

Озеро	Год	F, мг/л	PO ₄ , мгP/л	Mn, мкг/л	Fe, мкг/л	Ni, мкг/л	Cu, мкг/л	Zn, мкг/л	Al, мкг/л	Mo, мкг/л
Ильма	1984	н/д	н/д	2,6	30	9	3	н/д	н/д	н/д
	1995	н/д	0,074	5,3	20	1	1	0,9	120	н/д
	1996	н/д	0,014	0,2	60	1	1	2	25	н/д
	2019	1,3	0,065	<0,1	10	1	1	2,39	н/д	5,78
	2020	0,512	0,003	12,0	10	0	0	0	167	н/д
Кривое	1995	н/д	0,015	1,4	76	1	1	1,7	14	н/д
	2000	н/д	0,002	5,5	170	1	1	1	15	н/д
	2005	н/д	0,006	5,6	109	1	1	4,3	20	н/д
	2019	0,065	0,033	5,73	100	1	1	0,21	н/д	2,98
Ревдозеро	1995	н/д	0,001	6,5	36	1	1	0,9	28	н/д
	2000	н/д	0,034	4,2	65	1	1	0,3	9	н/д
	2005	н/д	0,098	9,4	179	1	1	1,1	31	н/д
	2019	0,064	0,036	0,25	100	1	1	5,31	н/д	1,89
Сикир	2019	0,814	0,009	<0,1	100	5	3	5,68	н/д	3,94
Ловозеро	2004	н/д	0,001	14,3	142	0,1	0,6	1,3	26	н/д
	2019	0,075	0,01	1,04	700	1	1	3,06	н/д	3,86
ПДК _{рх}	—	0,75	0,05	10	100	10	1	10	40	1

Примечание: н/д — анализ не проводился.

можно объяснить гумификацией водосборов [23]. В целом содержание загрязняющих веществ в пробах рассматриваемых озер в сравнении с другими озерами Мурманской области, испытывающими антропогенную нагрузку вследствие загрязнения сточными водами горнорудных предприятий, относительно невысокое. Так, оз. Куэтсьярви, источником поступления в воды которого ТМ и кислотных соединений является комбинат «Печенганикель» (переработка медно-никелевых сульфидных руд), — одно из самых загрязненных озер Мурманской области [8]. В озере наблюдаются повышенные содержания никеля (более чем в 200 раз) и меди (в 20 раз). В поверхностных водах Мончегорского полигона, загрязняемых сточными водами медно-никелевого комбината «Североникель», также обнаружены никель и медь в концентрациях, превышающих условно-фоновые на 1–2 порядка [21].

Для всех озер выявлено превышение предельно допустимых концентраций молибдена, что позволяет сделать вывод о том, что загрязнение происходит в процессе естественного выщелачивания подстилающих пород и не связано с работой предприятия. Сравнение с ранее полученными данными свидетельствует о незначительном изменении химического состава вод исследуемых объектов.

В поверхностных слоях ДО озер Ильма и Кривое отмечается довольно значительное увеличе-

ние концентраций ТМ относительно их фоновых содержаний в ДО озер Кольского полуострова [9, 12] (рис. 2).

Анализ содержания ТМ в ДО озер выявил превышение фоновых значений по ряду элементов. Для ДО оз. Кривое установлено незначительное превышение фоновых содержаний по цинку и четырехкратное — по стронцию. ДО оз. Ильма содержат повышенные количества марганца, цинка (содержание превышает фоновые значения в 2,5 раза) и стронция (превышение фоновых значений в 17 раз). Цинк относится к первому классу опасности (высокоопасные), марганец и стронций — к третьему (малоопасные)⁵. В отличие от приоритетных для озер Мурманской области ТМ — меди и никеля [7, 20, 21] — в ДО исследуемых озер их содержание не превышает фоновых значений. Стоит отметить, что фоновые значения, взятые из литературы, приведены для достаточно узкого набора элементов.

В связи с тем, что предприятие разрабатывает месторождение РЗЭ с применением гравитационной схемы обогащения, анализ ДО проводился также на содержание РЗЭ. В табл. 4 приведены результаты анализа ДО озер Ильма и Кривое, хвостов обогащения лопаритовых руд (поверхностный слой неэксплуатируемого поля хвостохранилища),

⁵ ГОСТ 17.4.1.02–83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения [online]. Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/1200012797> [дата обращения: 15.11.2020].

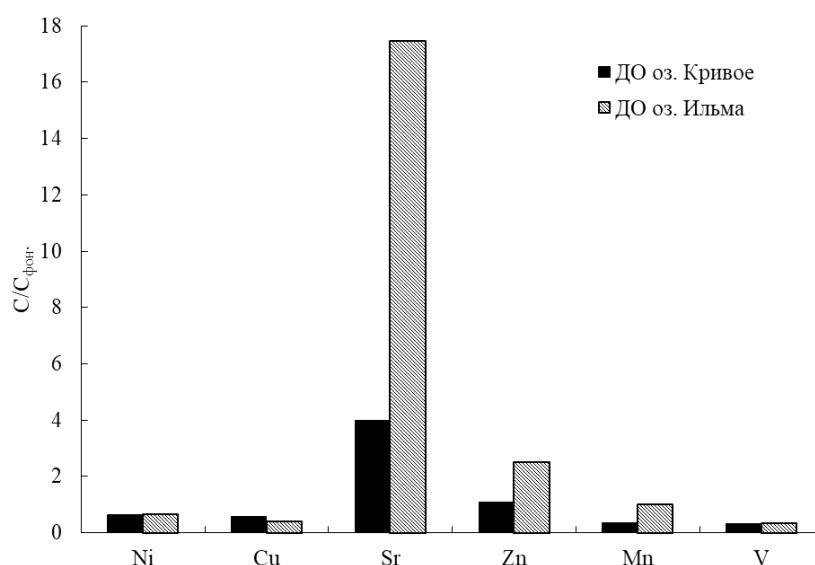


Рис. 2. Отношение содержания ТМ в ДО озер Ильма и Кривое к фоновому значению

кларки в земной коре по [3], пределы содержаний в ДО пресноводных экосистем по [16], средние концентрации в ДО оз. Имандра [10].

В отличие от ТМ, РЗЭ в водных объектах и ДО Мурманской области практически не изучены. Детально исследовано лишь оз. Имандра [10], повышенное содержание РЗЭ в воде и ДО которого обусловлено разработкой месторождения апатито-нефелиновых руд Хибинского щелочного массива [4]. Источником поступления РЗЭ указаны минеральные частицы в составе сточных вод АО «Апатит» после флотационного обогащения [10].

Средние содержания РЗЭ в ДО исследуемых озер подтверждают правило Оддо–Гаркина: лантаноиды с четными порядковыми номерами более распространены в земной коре, чем с нечетными [24]. При этом содержания РЗЭ в ДО оз. Кривое, расположенного к северу от предприятия на значительном удалении, ниже кларковых содержаний элементов в земной коре и ДО пресноводных экосистем. Содержание РЗЭ в ДО оз. Ильма многократно превышает указанные выше показатели. Сточные воды ООО «Ловозерский ГОК» не выпускаются в оз. Ильма, а значит, возможными путями загрязнения озера могут являться аэротехногенный перенос пылевых частиц с незакрепленных участков полей хранилищ отходов обогащения, дренажные воды

хвостохранилищ и процессы выщелачивания подстилающих пород.

О негативном влиянии предприятия на загрязнение р. Сергевань недостаточно очищенными сточными водами убедительно говорят результаты анализа проб воды, отобранные в реках Раслака и Сергевань до и после выпуска сточных вод (табл. 5).

Влияние сточных вод предприятия привело к повышению рН воды до 7,2–7,4. Основными загрязнителями являются взвешенные вещества, ионы железа, алюминия, марганца, цинка, фосфаты и фториды, концентрации которых превышают ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения в несколько раз. Ниже по течению, после хвостохранилища, происходит насыщение речных вод вторичными минералами: гидроксидами натрия, калия, кальция. По В. В. Шабанову [19] рассчитаны коэффициент предельного загрязнения (рис. 3) и индекс загрязнения вод (ИЗВ).

По классификационной шкале после приема сточных вод река от класса «очень чистая» ($ИЗВ \leq 0,2$) переходит в класс «очень грязная» ($ИЗВ \geq 6$).

Заключение

За последние 35 лет деятельности горнорудного предприятия «Ловозерский ГОК», единственного в России предприятия, разрабатыва-

Таблица 4

Содержание РЗЭ в ДО озер и других объектах, мг/кг

Элемент	ДО оз. Ильма	ДО оз. Кривое	Хвосты обогащения лопаритовых руд	Кларки элементов в земной коре*	Пределы содержаний в ДО пресноводных экосистем**	ДО оз. Имандра***
La	200,06	15,11	1648,00	30,00	19,5–100	103,00
Ce	408,79	27,79	3101,00	50,00	43–100	172,00
Pr	42,49	3,29	307,00	5,00	8–8,3	21,00
Nd	126,10	10,51	856,00	23,00	19–44	79,00
Sm	19,99	1,75	84,70	6,50	3,3–30	12,00
Eu	5,45	0,43	18,10	1,00	0,07–12,2	3,10
Gd	15,58	1,37	48,10	6,50	5,0–6,0	12,00
Tb	2,29	0,21	5,66	0,90	0,3–1,1	1,20
Dy	13,23	1,13	20,20	4,50	1,8–4,5	6,70
Ho	2,37	0,21	2,97	1,00	0,9–1,0	1,10
Er	6,19	0,56	7,15	2,50	2,6–3,0	3,00
Tm	0,81	0,08	0,85	0,25	0,40	0,37
Yb	5,29	0,51	5,49	3,00	1,4–4,4	2,30
Lu	0,70	0,07	0,79	0,70	0,2–0,5	0,29

Примечание: * — кларки элементов в земной коре по [3]; ** — пределы содержаний в ДО пресноводных экосистем по [16]; *** — среднее содержание в ДО оз. Имандра по [10].

Таблица 5

Гидрохимические показатели речной воды на разных створах, сточных вод и ПДК_{рх}

Показатель	Р. Раслака	Р. Сергевань до выпуска сточных вод	Сточная вода	Р. Сергевань после выпуска сточных вод	Р. Сергевань ниже хвостохранилища	ПДК _{рх}
pH	5,52	5,52	7,85	7,21	7,46	–
Щелочность, моль/л	0	0	0,707	0,519	0,768	–
Взвешенные вещества, мг/л	<0,7	<0,7	17,7	5,96	37,5	10
F, мг/л	0,02	0,02	8,28	4,43	9,44	0,75
PO ₄ , мгP/л	0	0	0,752	0,273	0,593	0,05
NO ₃ , мг/л	0	0	3,83	2,04	2,72	–
SO ₄ , мг/л	0,97	0,97	3,99	3,33	4,17	100
Cl, мг/л	1,15	1,15	1,02	1,01	1,19	300
K, мг/л	0,2	0,2	0,84	0,84	1,38	50
Na, мг/л	0,93	0,93	28,28	18,67	28,96	120
Ca, мг/л	0,19	0,19	0,22	0,34	0,65	180
Mn, мкг/л	10	10	22	13	33	10
Mg, мкг/л	80	80	20	50	110	4000
Fe, мкг/л	0	0	440	64	319	100
Ni, мкг/л	9	9	4	0	1	10
Cu, мкг/л	4	4	5	5	3	1
Zn, мкг/л	15	15	9	12	18	10
Al, мкг/л	0	0	1879	387	3185	40

ющего месторождение РЗЭ цериевой группы, тантала и ниобия, гидрохимический состав воды близлежащих озер не претерпел значительных изменений. Отмечено снижение водородного показателя и минерализации для озер Ильма, Кривое и Ревдозеро и повышение минерализации для оз. Ловозеро.

Проведенный химический анализ ДО озер Ильма и Кривое позволил установить значительное превышение содержаний стронция, цинка и марганца в ДО оз. Ильма по отношению к фоновым значениям. Вместе с тем, сравнение содержания РЗЭ в пробах ДО двух озер со средними содержаниями в земной коре выявило значительное загрязнение оз. Ильма ионами церия, лантана, ниобия, тантала, входящих в состав разрабатываемых пород и хвостов обогащения лопаритовых руд. Данные результаты свидетельствуют о подверженности оз. Ильма сильному антропогенному загрязнению. Возможными источниками поступления РЗЭ и ТМ могут быть пыление незакрепленных хвостов, дренажные воды хвостохранилищ, процессы выщелачивания подстилающих пород.

Подтверждено загрязнение р. Сергевань сточными водами предприятия, которые затем посту-

пают в оз. Ловозеро и постепенно изменяют его гидрохимический состав. Это в значительной степени может повлиять на традиционный уклад жизни коренного народа Ловозерского района саами, одним из видов хозяйственной деятельности которого является рыбная ловля. В числе основных загрязняющих веществ: взвешенные

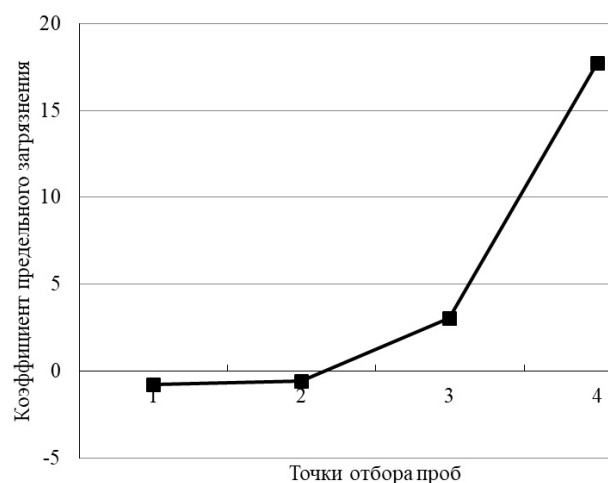


Рис. 3. Коэффициент предельного загрязнения поверхностных вод: 1 — р. Раслака; 2 — р. Сергевань до выпуска сточных вод; 3 — р. Сергевань после выпуска сточных вод; 4 — р. Сергевань ниже хвостохранилища

вещества, ионы алюминия, железа, цинка, марганца, фториды и фосфаты. На данный момент очистка стоков производится за счет разделения потоков шахтных вод, гравитационного осаждения взвесей в шахтных выработках, которые выведены из эксплуатации, и последующем смешивании с условно чистыми водами [13]. Усовершенствование системы очистки стоков и закрепление поверхностного слоя хвостохранилища, выведенного из эксплуатации 35 лет назад, позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН за проведение химического анализа проб воды исследуемых озер и рек и ДОО, а также сотрудников лабораторий экологии промышленного производства и водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН за помощь в отборе проб.

Работа выполнена в рамках тем НИР №№ 0226-2019-0045, 0226-2019-0011 и частично поддержана из средств гранта РФФИ №19-05-50065 Микромир.

Литература

1. Баранов, И. В. (1962). Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеиздат. 276 с.
2. Вельтишев, П. А. и Павлов, Н. С. (1940). Материалы к изучению глубин и грунтов озера Ловозеро. В: Верещагин, Г. Ю. (ред.). Материалы к изучению вод Кольского полуострова. М: Изд-во АН СССР, сс. 298–313.
3. Виноградов, А. П. (1962). Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. Геохимия, № 7, сс. 555–571.
4. Галахов, А. В. (1975). Петрология Хибинского щелочного массива. Л.: Наука, 256 с.
5. Горячев, А. А., Красавцева, Е. А., Лашук, В. В., Икконен, П. В., Смирнов, А. А., Максимова, В. В. и Макаров, Д. В. (2020). Оценка экологической опасности и возможности переработки хвостов обогащения лопаритовых руд. Экология и промышленность России, Т. 24, № 12, сс. 46–51. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-46-51.
6. Горячев, А. А., Лашук, В. В., Красавцева, Е. А., Алфертьев, Н. Л. и Макаров, Д. В. (2020). Геоэкологическая оценка современного состояния разновозрастных хвостохранилищ рудника Карнасурт. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, № 17, сс. 128–132. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.023.
7. Даувальтер, В. А. (2019). Гидрохимия озер в зоне влияния стоков производства железорудного сырья. Вестник МГТУ, Т. 22, № 1, сс. 167–176. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-167-176.
8. Даувальтер, В. А., Кашулин, Н. А., Денисов, Д. Б., Зубова, Е. М., Слукковский, З. И. и Мищуков, А. С. (2020). Изменение геоэкологического состояния арктического озера Куэтсьярви в постсоветское время. В: Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений. М.: РУДН, сс. 361–366.
9. Даувальтер, В. А., Кашулин, Н. А. и Сандимиров, С. С. (2012). Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов. Труды Кольского научного центра РАН «Прикладная экология Севера», № 9, сс. 55–87.
10. Даувальтер, В. А., Моисеенко, Т. И. и Родюшкин, И. В. (1999). Геохимия редкоземельных элементов в озере Имандра, Мурманская область. Геохимия, № 37 (4), сс. 376–383.
11. Денисов, Д. Б., Косова, А. Л. и Вокуева, С. И. (2020). Палеоэкологические исследования субарктических озер Мурманской области в позднем плейстоцене и голоцене. В: Биогеография и эволюционные процессы. Материалы LXVI сессии Палеонтологического общества при РАН. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, сс. 191–193.
12. Кашулин, Н. А., Даувальтер, В. А., Денисов, Д. Б., Валькова, С. А., Вандыш, О. И., Терентьев, П. М. и Кашулин, А. Н. (2013). Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области. Вестник МГТУ, Т. 16, № 1, сс. 98–107.
13. Красавцева, Е. А., Жилкин, Б. О., Макаров, Д. В., Светлов, А. В. и Горячев, А. А. (2020). Очистка сточных вод ООО «Ловозерский ГОК» от ионов фтора методом химической коагуляции. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, № 17, сс. 297–301. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.056.
14. Моисеенко, Т. И. (ред.) (2002). Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 403 с.
15. Мокрушина, О. Д. (2018). Первые данные по криотермометрии флюидных включений в нефелине лопаритового месторождения Ловозерского щелочного массива. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, № 15, сс. 251–254. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.062.
16. Никаноров, А. М. и Жулидов, А. В. (1991). Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 312 с.
17. Петрова, В. А. и Пашкевич, М. А. (2011). Состояние водных объектов в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий на примере ОАО «Ковдорский ГОК». Научный вестник Московского государственного горного университета, № 9, сс. 67–71.
18. Пожиленко, В. И., Гавриленко, Б. В., Жиров, Д. В. и Жабин, С. В. (2002). Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 359 с.
19. Шабанов, В. В. и Маркин, В. Н. (2009). Методика эколого-водохозяйственной оценки водных объектов. М.: ФГОУ ВПО МГУП, 154 с.
20. Dauvalter, V. A., Dauvalter, M. V., Kashulin, N. A. and Sandimirov, S. S. (2010). Chemical composition of bottom sedimentary deposits in lakes in the zone impacted by atmospheric emissions from the Severonickel plant. *Geochemistry International*, Vol. 48, Issue 11, pp. 1148–1153. DOI: 10.1134/S0016702910110091.
21. Dauval'ter, V. A., Dauval'ter, M. V., Saltan, N. V. and Semenov, E. N. (2009). The chemical composition of surface water in the influence zone of the Severonickel smelter. *Geochemistry International*, Vol. 47, Issue 6, pp. 592–610. DOI: 10.1134/S0016702909060056.
22. Kashulin, N. A., Dauvalter, V. A., Denisov, D. B., Valkova, S. A., Vandysh, O. I., Terentjev, P. M. and Kashulin, A. N. (2017). Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region. *Journal of Environmental*

Science and Health, Part A, Vol. 52, Issue 9, pp. 921–929. DOI: 10.1080/10934529.2017.1318633.

23. Moiseenko, T. I., Dinu, M. I., Gashkina, N. A. and Kremleva, T. A. (2013). Occurrence forms of metals in natural waters depending on water chemistry. *Water Resources*, Vol. 40, Issue 4, pp. 407–416. DOI: 10.1134/S009780781304009X.

24. Nikanorov, A. M. (2009). The Oddo-Harkins rule and distribution of chemical elements in freshwater ecosystems. *Doklady Earth Sciences*, Vol. 426, Issue 1, pp. 600–604. DOI: 10.1134/S1028334X09040205.

References

1. Baranov, I. V. (1962). *Limnological types of lakes in the USSR*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 276 p.

2. Veltishchev, P. A. and Pavlov, N. S. (1940). Materials on the study of the depths and soils of Lake Lovozero. In: Vereshchagin, G. Yu. (ed.). *Materials on the study of the Kola Peninsula waters*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, pp. 298–313.

3. Vinogradov, A. P. (1962). Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geokhimiya*, No. 7, pp. 555–571.

4. Galakhov, A. V. (1975). *Petrology of the Khibiny alkaline massif*. Leningrad: Nauka, 256 p.

5. Goryachev, A. A., Krasavtseva, E. A., Lashchuk, V. V., Ikkonen, P. V., Smirnov, A. A., Maksimova, V. V. and Makarov, D. V. (2020). Assessment of the environmental hazard and possibility of processing of refinement tailings of loparite ores concentration. *Ecology and Industry of Russia*, Vol. 24, No. 12, pp. 46–51. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-46-51.

6. Goryachev, A. A., Lashchuk, V. V., Krasavtseva, E. A., Alfertev, N. L. and Makarov, D. V. (2020). Current state geoecological assessment of the different ages enrichment tailing dumps of the Karnasurt mine. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences*, No. 17, pp. 128–132. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.023.

7. Dauvalter, V. A. (2019). Lakes hydrochemistry in the zone of influence of iron-mining industry waste waters. *Vestnik of MSTU*, Vol. 22, No. 1, pp. 167–176. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-167-176.

8. Dauvalter, V. A., Kashulin, N. A., Denisov, D. B., Zubova, Ye. M., Slukovsky, Z. I. and Mitsukov, A. S. (2020). Changes in the geoecological state of the Arctic lake Kuetsjärvi in the post-Soviet period. In: *Sergeev's Readings: Geoecological Aspects of the Ecology National Project Implementation. Dialogue Between Generations*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia, pp. 361–366.

9. Dauvalter, V. A., Kashulin, N. A. and Sandimirov, S. S. (2012). The tendencies of changes of chemical composition of fresh water subarctic and arctic reservoirs sediments under the influence of natural and anthropogenic factors. *Transactions. Kola Science Center. Applied Ecology of the North*, No. 9, pp. 55–87.

10. Dauvalter, V. A., Moiseyenko, T. I. and Rodyushkin, I. V. (1999). Geochemistry of rare earth elements in Lake Imandra, Murmansk Region. *Geokhimiya*, No. 37 (4), pp. 376–383.

11. Denisov, D. B., Kosova, A. L. and Vokuyeva, S. I. (2020). Paleocological studies of subarctic lakes in the Murmansk Region in the late Pleistocene and Holocene. In: *Biogeography and Evolutionary Processes. Proceedings of the 76th Session of the Paleontological Society of the Russian Academy of Sciences*. Saint Petersburg: Map-Making Factory of the Russian Geological Research Institute, pp. 191–193.

12. Kashulin, N. A., Dauvalter, V. A., Denisov, D. B., Valkova, S. A., Vandysh, O. I., Terent'ev, P. M. and Kashulin, A. N.

(2013). Some aspects of current state of freshwater resources in the Murmansk Region. *Vestnik of MSTU*, Vol. 16, No. 1, pp. 98–107.

13. Krasavtseva, E. A., Zhilkin, B. O., Makarov, D. V., Svetlov, A. V. and Goryachev, A. A. (2020). Wastewater treatment of the Lovozersky GOK LLC from fluorine ions by chemical coagulation. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences*, No. 17, pp. 297–301. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.056.

14. Moiseenko, T. I. (ed.) (2002). *Anthropogenic modifications of the Imandra Lake ecosystem*. Moscow: Nauka, 403 p.

15. Mokrushina, O. D. (2018). First data on cryothermometry of fluid inclusions in nepheline in the loparite field of the Lovozero alkaline massif. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences*, No. 15, pp. 251–254. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.062.

16. Nikanorov, A. M. and Zhulidov, A. V. (1991). *Biomonitoring of metals in freshwater ecosystems*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 312 p.

17. Petrova, V. A. and Pashkevich, M. A. (2011). Monitoring and environmental impact assessment of industrial facilities of the Kovdor Mining and Processing Plant to the surface water. *Scientific Bulletin of Moscow State Mining University*, No. 9, pp. 67–71.

18. Pozhilenko, V. I., Gavrilenko, B. V., Zhironov, D. V. and Zhabin, S. V. (2002). *Geology of mineral areas of the Murmansk Region*. Apatity: Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 359 p.

19. Shabanov, V. V. and Markin, V. N. (2009). *Methodology for the environmental and water management assessment of water bodies*. Moscow: Moscow State University of Environmental Engineering, 154 p.

20. Dauvalter, V. A., Dauvalter, M. V., Kashulin, N. A. and Sandimirov, S. S. (2010). Chemical composition of bottom sedimentary deposits in lakes in the zone impacted by atmospheric emissions from the Severonickel plant. *Geochemistry International*, Vol. 48, Issue 11, pp. 1148–1153. DOI: 10.1134/S0016702910110091.

21. Dauval'ter, V. A., Dauval'ter, M. V., Saltan, N. V. and Semenov, E. N. (2009). The chemical composition of surface water in the influence zone of the Severonickel smelter. *Geochemistry International*, Vol. 47, Issue 6, pp. 592–610. DOI: 10.1134/S0016702909060056.

22. Kashulin, N. A., Dauvalter, V. A., Denisov, D. B., Valkova, S. A., Vandysh, O. I., Terentjev, P. M. and Kashulin, A. N. (2017). Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, Vol. 52, Issue 9, pp. 921–929. DOI: 10.1080/10934529.2017.1318633.

23. Moiseenko, T. I., Dinu, M. I., Gashkina, N. A. and Kremleva, T. A. (2013). Occurrence forms of metals in natural waters depending on water chemistry. *Water Resources*, Vol. 40, Issue 4, pp. 407–416. DOI: 10.1134/S009780781304009X.

24. Nikanorov, A. M. (2009). The Oddo-Harkins rule and distribution of chemical elements in freshwater ecosystems. *Doklady Earth Sciences*, Vol. 426, Issue 1, pp. 600–604. DOI: 10.1134/S1028334X09040205.

Авторы

Красавцева Евгения Андреевна

Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЛПТиТБА ФИЦ КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

Институт Проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

Сандимиров Сергей Степанович, канд. геогр. наук

Институт Проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

E-mail: s.sandimirov@ksc.ru

Authors

Eugenia Andreyevna Krasavtseva

Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

Sergey Stepanovich Sandimirov, PhD in Geography

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: s.sandimirov@ksc.ru