



Научная статья

УДК 574.5; 504.4

Геоэкологическая характеристика донных отложений озера Имандра в зоне влияния деятельности Кольской атомной электростанции

В. А. Даувальтер ^{✉1}

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, 184209, Россия, г. Апатиты, Академгородок, ул. Ферсмана, д. 14а

Сведения об авторе

Даувальтер Владимир Андреевич, SPIN-код: 4675-7960, ORCID: 0000-0002-0372-5088, Scopus AuthorID: 6602899016, e-mail: v.dauvalter@ksc.ru

Для цитирования: Даувальтер, В. А. (2026) Геоэкологическая характеристика донных отложений озера Имандра в зоне влияния деятельности Кольской атомной электростанции. *Евразийский географический журнал*, т. 1, № 1, с. 42–52.

Получена 5 мая 2025; прошла рецензирование 20 мая 2025; принята 30 мая 2025.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках темы НИР ИППЭС КНЦ РАН № FMEZ-2024-0014.

Права: © В. А. Даувальтер (2026). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях [лицензии CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Аннотация. Представлены результаты исследований химического состава донных отложений озера Имандра в зоне влияния сточных вод функционирующей полвека Кольской атомной электростанции. Атомные электростанции являются промышленными объектами высокой экологической опасности, поэтому всегда находятся под пристальным вниманием контролирующих экологических органов, средств массовой информации и общественности. Поэтому сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН) периодически проводятся исследования наземных и водных экосистем в рамках выполнения государственного задания. Исследования, в состав которых входило изучение химического состава донных отложений озера Имандра, были проведены в 2023 году. Были отобраны колонки донных отложений на двух станциях, по которым имеются результаты тридцатилетней давности. Колонки донных отложений были разобраны по слоям по 1 см, и в отобранных пробах был проведен химический анализ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, позволяющий определить концентрации более 50 элементов, включая макро- и микроэлементы. По результатам исследований установлено, что основными загрязняющими элементами являются тяжелые металлы (Cu, Ni, Co, Zn, Cd, Pb, Bi и As), а также щелочноземельные металлы (Ca и Sr), основными источниками поступления которых в озеро Имандра являются предприятия горнодобывающего, горно-обогатительного и горно-металлургического комплекса, главным образом комбината «Североникель» и ПО «Апатит». Вклад деятельности Кольской АЭС в загрязнении озера минимальный и заключается в перекачке вод из более загрязненного плеса Йокостровской Имандры в плес Бабинской Имандры, а также в тепловом загрязнении близлежащей к станции акватории за счет поступления подогретых вод после охлаждения агрегатов станции.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, Кольская атомная электростанция, озеро Имандра, донные отложения, геоэкологическая характеристика, загрязнение, тяжелые металлы, микроэлементы, щелочноземельные металлы

Geocological characteristics of Lake Imandra sediments within the zone of influence of the Kola Nuclear Power Plant

V. A. Dauvalter ¹

¹Institute of North Industrial Ecology Problems of INEP KSC RAS,
14a Fersman Str., Akademgorodok, Apatity 184209, Russia

Author

Vladimir A. Dauvalter, SPIN: 4675-7960, 0000-0002-0372-5088, Scopus AuthorID: 6602899016, e-mail: v.dauvalter@ksc.ru

For citation: Dauvalter, V. A. (2026) Geocological characteristics of Lake Imandra sediments in the zone of influence of the Kola Nuclear Power Plant. *Eurasian Journal of Geography*, vol. 1, no. 1, pp. 42–52.

Received 5 May 2025; reviewed 20 May 2025; accepted 30 May 2025.

Funding: The research was conducted as part of research project No. FMEZ-2024-0014 of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.

Copyright: © V. A. Dauvalter (2026). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under [CC BY License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract. The article presents the results of a study investigating the chemical composition of Lake Imandra sediments within the zone of influence of wastewater discharge from the Kola Nuclear Power Plant (KNPP), which has been operational for half a century. Nuclear power plants are industrial facilities of high environmental hazard and are therefore subject to consistent scrutiny by regulatory authorities, the media, and the public. Accordingly, as part of a state-mandated research program, staff from the Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences periodically conducts investigations of terrestrial and aquatic ecosystems. The present study, which included an analysis of the chemical composition of Lake Imandra sediments, was performed in 2023. Sediment cores were collected at two stations, for which thirty-year-old comparative data are available. The cores were sectioned into 1 cm layers, and chemical analysis of the selected samples was performed using inductively coupled plasma mass spectrometry, enabling the determination of concentrations for over 50 elements, including macro- and microelements. The results indicate that the primary contaminant elements are heavy metals (Cu, Ni, Co, Zn, Cd, Pb, Bi, and As) as well as alkaline earth metals (Ca and Sr). The main sources of these elements in Lake Imandra are mining and metal processing enterprises, predominantly the Severonikel Plant and the Apatit Production Association. The contribution of the KNPP to lake pollution is minimal, consisting primarily of the transfer of water from the more contaminated Yokostrovskaya Imandra reach to the Babinskaya Imandra reach, and the thermal pollution of the adjacent water area due to the discharge of heated water following reactor cooling.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, Kola Nuclear Power Plant, Lake Imandra, sediments, geocological characteristics, pollution, heavy metals, microelements, alkaline earth metals

Введение

Кольская атомная электростанция (КАЭС) — самая северная атомная станция в Европейской части Российской Федерации. Она является основным производителем электроэнергии для энергосистемы Мурманской области и Республики Карелия. Кольская энергетическая система включает 17 гидроэлектростанций, две тепловых электростанции на органическом топливе, КАЭС и приливную электростанцию (Минин 2017).

Уникальная особенность Кольской энергосистемы в том, что практически весь объем генерируемой в Мурманской области электроэнергии вырабатывается на гидроэлектростанциях и КАЭС в соотношении 50 на 50, то есть почти 50 % вырабатываемой на гидроэлектростанциях электро-

энергии зависит от наличия необходимого объема воды в водохранилищах, и резервным источником выработки электроэнергии является КАЭС (поскольку на долю ТЭЦ приходится только 3 %) (Моисеенко и др. 1996).

История выработки электроэнергии на КАЭС берет начало с 1973 года, когда на берегу озера Иmandра были введены в строй два блока мощностью по 440 МВт. В 1984 году было введено в эксплуатацию еще два блока. Для охлаждения агрегатов станция забирает воду из Йокостровской Иmandры и в подогретом состоянии сбрасывает в Бабинскую Иmandру (рис. 1), таким образом, перекачивая воду из более загрязненной акватории озера в менее загрязненную (Моисеенко 2002).

Общий расход воды для охлаждения агрегатов в период максимальной нагрузки станции

составлял около 80 м³/с. В отводной канал КАЭС поступают также сточные воды предприятия и промышленно-ливневой канализации и хозяйственно-бытовые сточные воды после прохождения через очистные сооружения.

С целью оценки экологического состояния озера Имандра в зоне влияния деятельности Кольской АЭС в рамках выполнения государственного задания летом 2023 года сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН проводились исследования состояния наземных и водных экосистем, в том числе осуществлялся отбор колонок донных отложений (ДО) на двух станциях: Зашеечная губа плеса Йокостровская Имандра (станция 3) и около острова Хорт плеса Бабинская Имандра (станция 8) (рис. 1). В ранее опубликованной монографии (Маслобоев и др. 2020) эти станции соответственно имели коды: F-11 и В-3.

Методы

Образцы ДО извлекались с помощью отборника колонок открытого гравитационного типа в соответствии с разработанными в ИППЭС

КНЦ РАН методиками (Моисеенко 2002; Сандимиров и др. 2019).

Мощность отобранных колонок ДО на станциях Зашеечная губа и около острова Хорт составляла соответственно 54 и 43 см. Колонки ДО были послойно разделены на слои по 1 см, помещены в полиэтиленовые пакеты и отправлены в лабораторию для анализа. Первичная обработка и химический анализ проб ДО проводились в Центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Определение концентраций элементов, включая тяжелые металлы, в пробах ДО производилось масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой ICP-MS, что позволило значительно расширить перечень элементов (до более 50) по сравнению с ранее проведенными исследованиями (Маслобоев 2020), когда были представлены результаты по основным приоритетным для Имандры загрязняющим тяжелым металлам (ТМ), концентрации которых были определены с помощью атомно-абсорбционной спектрометрии. На исследованных станциях 3 и 8 были отобраны колонки ДО примерно в тех же местах,

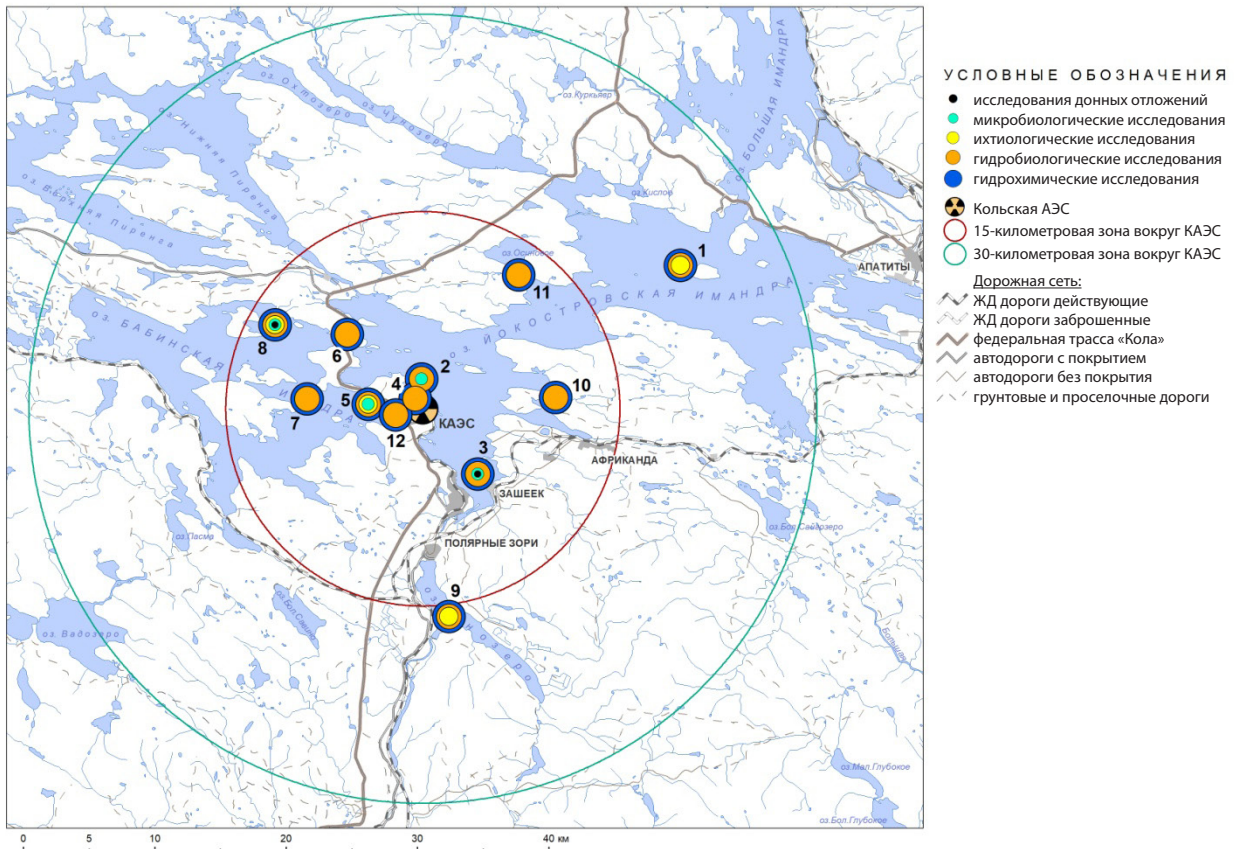


Рис. 1. Схема отбора гидрохимических и гидробиологических проб и донных отложений на озере Имандра в зоне влияния деятельности Кольской АЭС

Fig. 1. Map of hydrochemical, hydrobiological, and sediments sampling on Lake Imandra within the zone of influence of the Kola Nuclear Power Plant

на которых были отобраны образцы во время проведения съемки в 1993 году, результаты которой опубликованы ранее (Моисеенко 2002; Моисеенко и др. 1996).

Результаты и обсуждение

В данной статье представлены результаты исследования химического состава ДО на станциях 3 и 8 на глубине до 25 см, потому что для исследования динамики содержания элементов взяты также данные 30-летней давности, когда были отобраны колонки мощностью 23 и 14 см на соответствующих станциях. Согласно ранее проведенным исследованиям в 2018 году на озере Имандра под руководством члена-корреспондента РАН Т. И. Моисеенко, скорость осадконакопления, определенная по радиоактивному изотопу ^{210}Pb , на близлежащей к изучаемой акватории станции около острова Кумужий плеса Йокостровская Имандра составляет 1,8 мм/год (Малиновский и др. 2005).

При допущении равенства скорости осадконакопления на исследованных станциях нижний слой колонки в 25 см отложился 140 лет тому назад, то есть в конце XIX века, что вполне достаточно для фиксирования влияния антропогенной деятельности на водосборе Имандры, в том числе и горнодобывающего и горно-металлургического производства, и деятельности КАЭС.

На водосборе Имандры уже почти столетие функционируют предприятия горнодобывающего, горно-обогательного и горно-металлургического комплекса (АО «Апатит», комбинат «Североникель», АО «Олкон», Ковдорский ГОК), в озеро сбрасываются недостаточно очищенные коммунально-бытовые стоки, поэтому химический состав воды и ДО озера претерпел серьезные преобразования ранее (Моисеенко 2002; Моисеенко и др. 1996).

Эти изменения затронули также и акватории Йокостровской и Бабинской Имандры вокруг Кольской АЭС. Наиболее серьезное влияние оказали стоки и атмосферные выбросы комбината «Североникель», что сказалось в значительном увеличении содержания ТМ в поверхностных слоях ДО Зашеечной губы (станция 3) (рис. 2).

Исследование химического состава толщи ДО Зашеечной губы, недалеко от истока единственной реки Нивы, вытекающей из озера Имандра, вызывает интерес вследствие того, что через эту акваторию происходит сток практически всего растворенного и взвешенного материала, поступившего в Имандру с промыш-

ленными и коммунальными стоками и с территории водосбора и не осевшего до этой акватории на дно озера. На акватории вследствие снижения стоковых скоростей перед истоком Нивы создается своеобразный механический геохимический барьер, способствующий интенсификации осадконакопления.

Максимальные выбросы загрязняющих веществ комбинатом «Североникель», включая ТМ Ni (до 7.5 тыс. т/год) и Cu (до 5.7 тыс. т/год), зафиксированы в конце 1980-х годов (Моисеенко 2002).

Скорее всего, максимальные содержания этих приоритетных для региона загрязняющих ТМ в ДО станции 3 датируются началом 1990-х годов, потому что осаждение взвешенных веществ, поступающих от источника загрязнения, происходит с некоторой задержкой, и необходимо время на транспортировку и осаждение материала до изучаемой акватории, а длина Имандры составляет более 100 км. Максимальное содержания приоритетных загрязняющих ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Cd и Pb) фиксируются в толще ДО 4–6 см станции 3 (рис. 2), что соответствует 1990-м по времени осадконакопления согласно установленной скорости образования ДО в озере (1,8 мм/год). Максимальные концентрации ТМ в ДО станции 3 превышают их фоновые содержания в нижней части колонки ДО в 26, 5, 6, 4, 19 и 9 раз для Ni, Cu, Co, Zn, Cd и Pb соответственно (рис. 2). В поверхностных слоях ДО происходит уменьшение содержания ТМ, поэтому значения коэффициента загрязнения (C_f — рассчитанное как отношение концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое ДО к содержанию этого элемента в самой нижней части колонки, определяемого как фоновое (Håkanson 1980)) на станции 3 меньше рассчитанных ранее отношений максимальных содержаний к фоновым (табл. 1).

В ДО, отобранных на станциях Зашеечная губа (3) и около острова Хорт (8) три десятилетия назад, в 1993 году, максимальные значения ТМ отмечаются ближе к поверхности ДО, на меньшей глубине (рис. 2), что закономерно, так как за прошедшие 30 лет происходит снижение стоков и выбросов загрязняющих ТМ комбинатом «Североникель» и другими промышленными предприятиями и соответственно снижение содержания ТМ в поверхностных слоях ДО (Даувальтер и др. 2023).

Содержание Cd и Pb в ДО обеих станций в колонках, отобранных в 1993 году больше, чем для ДО, отобранных спустя 30 лет (рис. 2), что, скорее всего, связано со сменой аналитического оборудования и методов определения

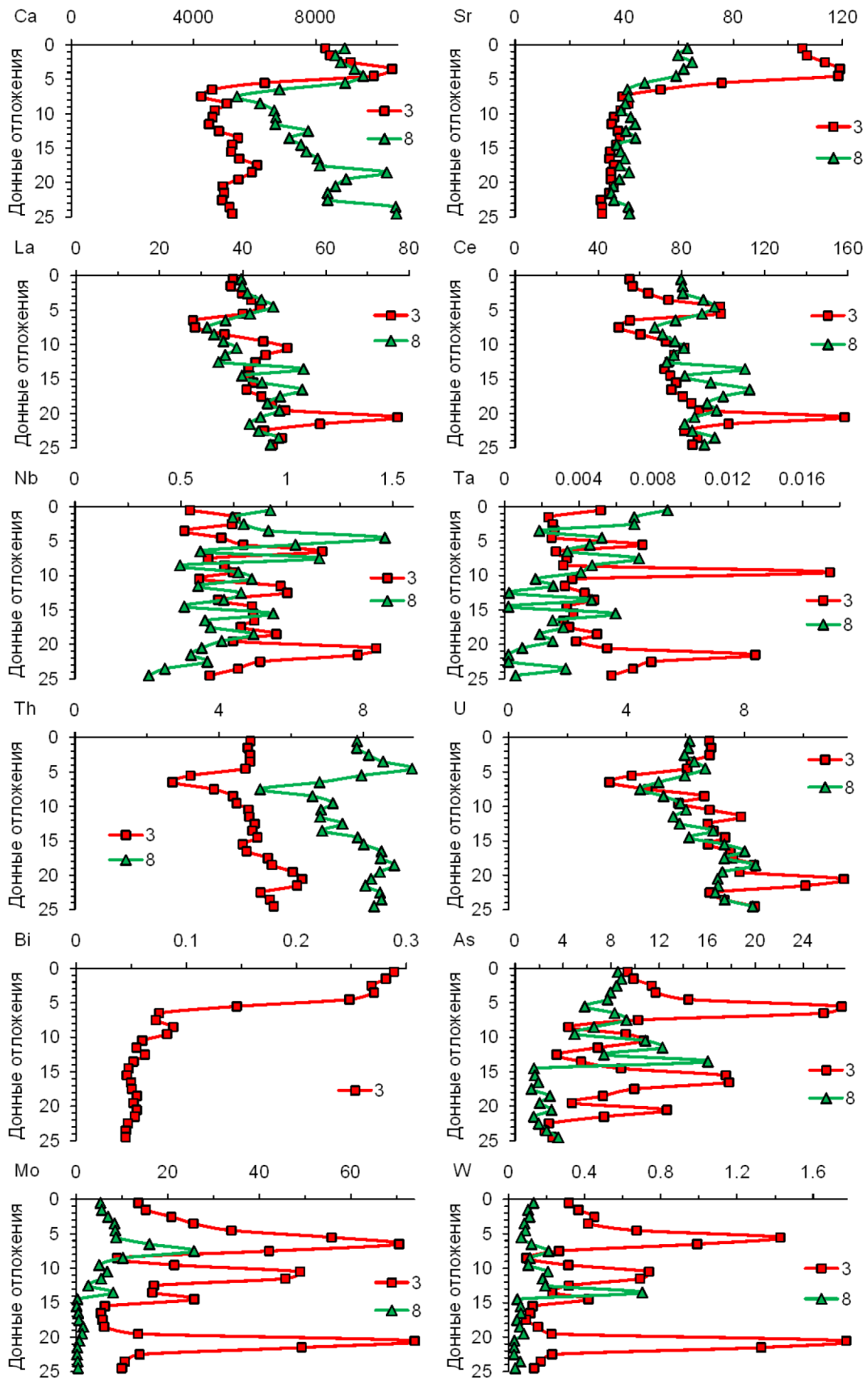


Рис. 2. Вертикальное распределение ТМ (мкг/г) в ДО станций Зашеечная губа (3) и остров Хорт (8)

Fig. 2. Vertical distribution of heavy metals ($\mu\text{g/g}$) in the sediments of the Zashchecnaya Inlet (3) and Khort Island (8) stations

Табл. 1. Концентрации (мкг/г) ТМ в поверхностных (0–1 см) и фоновых слоях ДО (Фон — содержания в нижней части колонки ДО) и значения коэффициента (C_p) и степени загрязнения (C_d) на исследованных станциях: Зашеечная губа (3) и около острова Хорт (8)

Table 1. Concentrations ($\mu\text{g/g}$) of heavy metals in the surface (0–1 cm) and background sediment layers (Background — content in the lower part of the sediment core), along with the contamination factor (C_p) and contamination degree (C_d) values at the studied stations of Zashееchnaya Inlet (3) and near Khort Island (8)

Станция Station	Слой, см Layer, cm	Ni	Cu	Co	Zn	Cd	Pb	C_d
	0–1	227	140	13.5	158	0.294	17.4	
3	Background	47	35	9.9	49	0.073	2.8	
	C_f	6.0	4.1	1.4	3.2	4.0	6.2	24.9
	0–1	150	124	18.1	107	0.469	22.9	
8	Background	42	41	11.0	56	0.068	4.1	
	C_f	3.5	3.0	1.7	1.9	6.9	5.6	22.6

концентраций этих ТМ. Современные методы аналитических исследований позволяют получить более точные данные о содержании элементов в ДО.

Несмотря на снижение содержаний ТМ в поверхностных слоях ДО, загрязнение ДО Зашеечной губы остается на довольно высоком уровне. Наибольшие значения коэффициентов загрязнения (высокие по классификации Л. Хокансона (Håkanson 1980)) зафиксированы для Pb и Ni, а значительные для Cu и Cd (табл. 1). Значение степени загрязнения (C_d), рассчитанное как сумма коэффициентов загрязнения шести ТМ (Cu, Ni, Co, Zn, Cd и Pb), на станции 3 оценивается как высокое по классификации Л. Хокансона. Таким образом, несмотря на существенное снижение содержания ТМ в поверхностных слоях по сравнению с максимальными значениями в ДО, отложившимися в 1990-х годах, влияние промышленных предприятий, в первую очередь комбината «Североникель», на формирование химического состава ДО, а следовательно, на экологическое состояние акватории Зашеечной губы плеса Йокостровская Имандра остается высоким. Повышенное содержание Ni может быть также связано с выбросами тепловых электростанций и котельных, вместе с которыми в окружающую среду в повышенном содержании поступает также и V (Slukovskii 2023).

Содержание ТМ в ДО на станции около острова Хорт (8) меньше, чем на станции Зашеечная губа (3), что связано с тем, что акватория Бабинской Имандры не подвержена прямому влиянию сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса. Несмотря на этот факт, вследствие аэротехногенного загрязнения водосбора Бабинской Имандры

на станции 8 отмечается максимум подповерхностных концентраций (для Cu — поверхностных) всех исследованных ТМ в толще ДО (рис. 2). Вероятно также поступление загрязняющих веществ с водой через каналы Кольской АЭС и протоку между Йокостровской и Бабинской Имандрами — Широкою Салму — во время ветровых нагонных (а также компенсационных) течений восточного направления, особенно осенью (октябрь — ноябрь) перед ледоставом. Превышение максимальных содержаний ТМ над фоновыми значениями в самых глубоких частях колонки ДО станции 8, отобранной в 2023 году, составляет 5.4, 3.0, 3.1, 2.5, 11.0 и 6.9 раза для Ni, Cu, Co, Zn, Cd и Pb соответственно (рис. 2).

Наибольшие значения коэффициентов загрязнения для ДО станции 8 около острова Хорт (высокие по классификации Л. Хокансона) зафиксированы для Cd, значительные для Pb, Ni и Cu (табл. 1). Значение степени загрязнения (C_d), рассчитанное как сумма коэффициентов загрязнения шести ТМ (Cu, Ni, Co, Zn, Cd и Pb), на станции 8 оценивается как значительное по классификации Л. Хокансона, приближающееся к высокому.

Влияние изменений геохимических условий (окислительно-восстановительного потенциала Eh и кислотно-щелочных условий pH) в толще воды и ДО исследуемых акваторий сказалось в наличии подповерхностных максимумов содержания Mn и Fe соответственно на глубине 5 и 6–8 см ДО (рис. 3). В толще ДО Зашеечной губы зафиксировано также максимальное содержание Fe — до 24 % в слое ДО 20–21 см. Высокое содержание Fe и Mn дает возможность образования в ДО аутигенных минералов, таких как пирит или другого минералообразования

в виде железомарганцевых конкреций (Батурин и др. 2009; Вализер др. 2012; Масленникова и др. 2014; Пальчик и др. 2009).

Максимальное содержание Fe фиксируется на большей глубине ДО, чем Mn, вследствие того, что окисление растворенного оксида Fe^{2+} до нерастворимого Fe^{3+} происходит быстрее, чем окисление растворенного иона Mn^{2+} до нерастворимых оксидов Mn^{4+} , то есть образование труднорастворимых соединений Fe происходит при меньших величинах Eh (Малиновский и др. 2005; Davison 1993).

Содержание Mn к поверхности ДО на станции 3 Зашеечная губа увеличивается более чем в 50 раз, а Fe — в 6 раз (рис. 3).

Влияние стоков предприятий АО «Апатит», деятельность которых составляет почти вековую историю с конца 1920-х годов, сказалось в увеличении концентраций в верхних 5–7 см ДО Зашеечной губы и около острова Хорт элементов, содержащихся в апатитнефелиновых рудах и вскрышных породах (рис. 4). Прежде всего, это касается элемента, содержащегося в главном рудном минерале апатите ($Ca_5[PO_4]_3F$) — Ca, а также сопутствующего ему щелочноземельного металла Sr, который также содержится в апатите, встречается разновидность фторапатита — стронциоапатит ($Sr_3Ca_2[PO_4]_3F$), в котором содержание оксида стронция около 50 % (Барабанов и др. 1999). К поверхности ДО зафиксировано постепенное снижение содержания этих щелочноземельных металлов, связанное со снижением производства (Барабанов и др.

1999) и стоков загрязняющих веществ предприятий АО «Апатит» после развала СССР в начале 1990-х годов (рис. 4). Заметного увеличения содержания других щелочноземельных металлов, а также щелочных металлов, зафиксированного ранее в ДО водоема, принимающего прямые стоки предприятий АО «Апатит», озера Большой Вудъявр (Dauvalter et al. 2022), и в ДО Йокостровской Имандры, на исследуемых станциях не происходит.

Несмотря на то что в стоках апатит-нефелинового производства присутствуют высокие концентрации редкоземельных элементов, увеличения их содержания, описанного ранее по результатам исследований геохимической миграции элементов в озерах Имандра и Большой Вудъявр (Dauvalter et al. 2022), в ДО исследуемых акваторий Зашеечной губы и около острова Хорт не происходит (рис. 4). Также не происходит увеличения содержания Nb и Ta (рис. 4), присутствующих в ряде титансодержащих минералов (например, титанит, ильменорутил, лопарит, ловчоррит), широко распространенных в Хибинских горных породах и рудных телах апатит-нефелиновых месторождений.

Подобная закономерность выявлена и для радиоактивных элементов Th и U (рис. 4), концентрации которых увеличиваются в поверхностных слоях ДО Большого Вудъявра (Dauvalter et al. 2022), вследствие их присутствия в незначительных количествах (от долей до первых %) практически во всех минералах, содержащих Nb и Ta (Яковенчуки др. 1999).

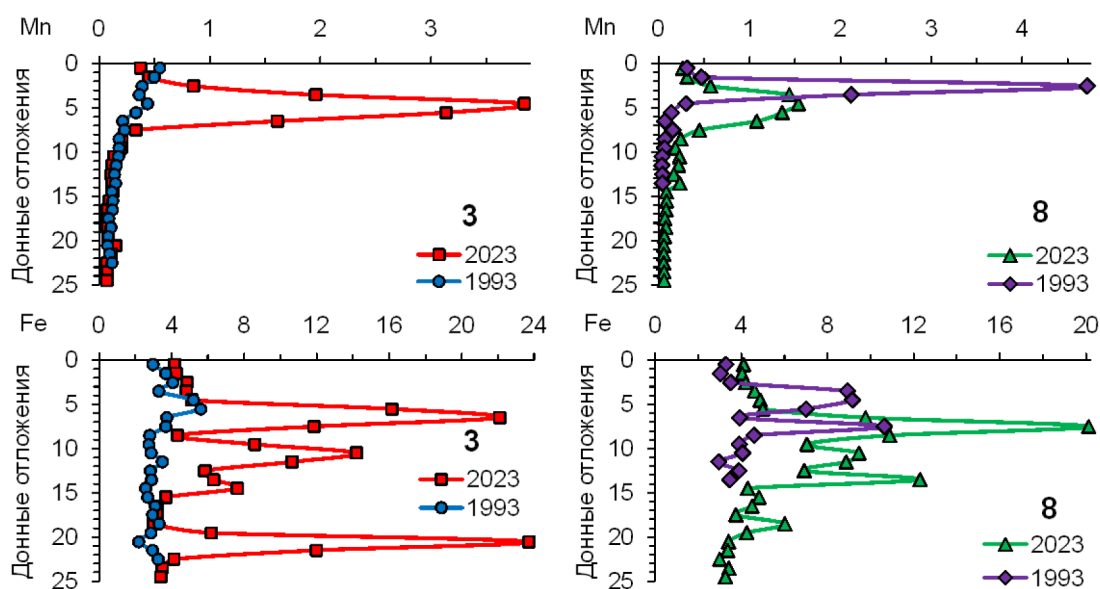


Рис. 3. Вертикальное распределение Mn и Fe (%) в ДО станций Зашеечная губа (3) и остров Хорт (8)

Fig. 3. Vertical distribution of Mn and Fe (%) in the sediments of the Zashееchnaya Inlet (3) and Khort Island (8) stations

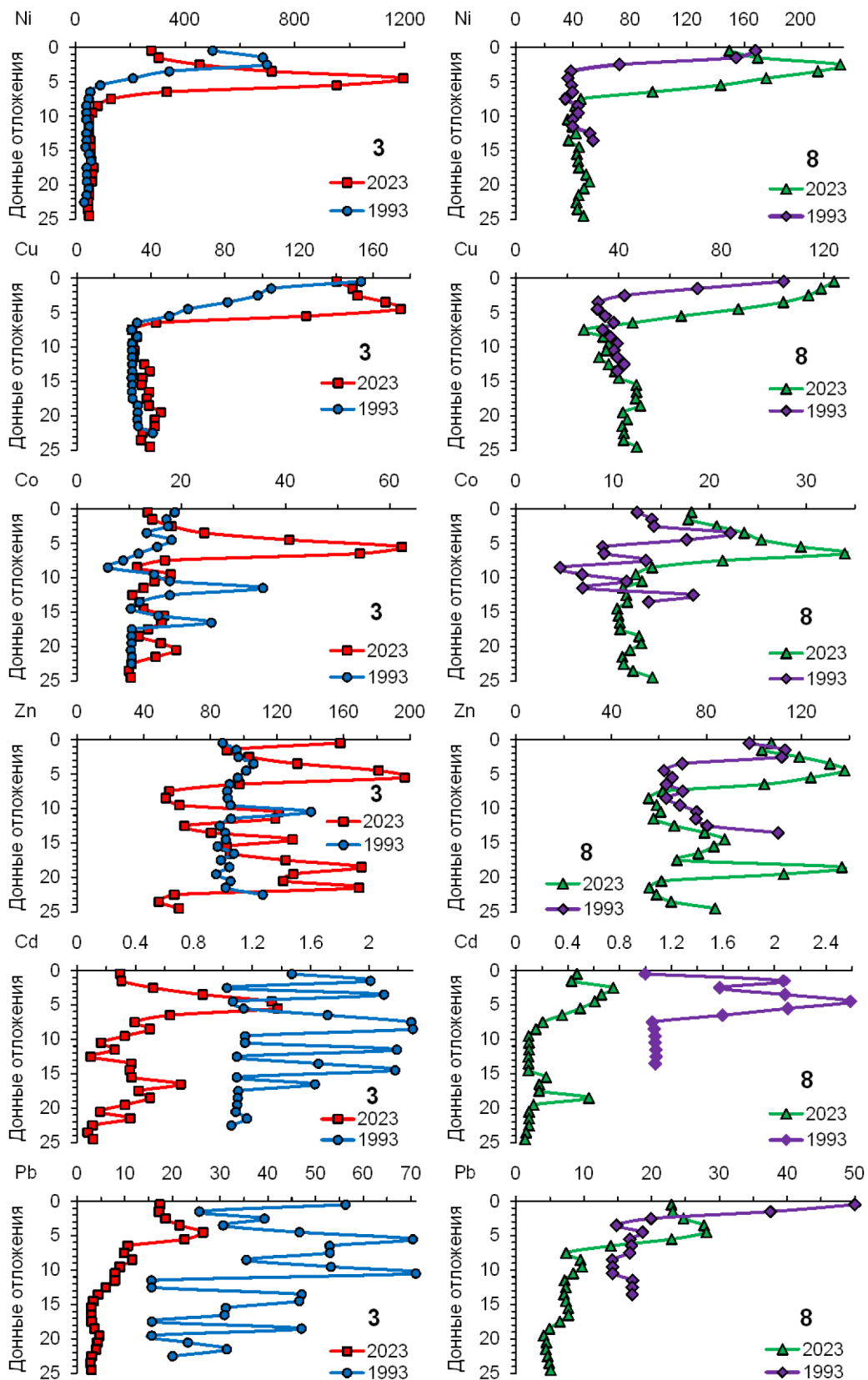


Рис. 4. Вертикальное распределение элементов (мкг/г) в ДО станций Зашеечная губа (3) и остров Хорт (8)

Fig. 4. Vertical distribution of elements ($\mu\text{g/g}$) in the sediments of the Zashechnaya Inlet (3) and Khort Island (8) stations

Отмечается очень высокая корреляция Th и U (до 0.94) со всеми редкоземельными элементами в ДО Зашеечной губы. Уменьшение содержания U от нижних слоев ДО к поверхности выявлено также в озерах Карелии и Мурманской области (Slukovskii 2023).

Отмечено увеличение содержания Bi и As в поверхностных слоях ДО исследуемых акваторий Зашеечной губы и около Хорта (рис. 4). Скорее всего, это влияние двух основных источников поступления загрязняющих веществ в озеро Имандра: комбината «Североникель» и АО «Апатит», потому что эти элементы, особенно Bi в ДО Зашеечной губы, имеют высокие коэффициенты корреляции как с ТМ (Ni, Cu, Pb), так и со щелочноземельными металлами (Ca, Sr). В ДО Большого Вудъявра также зафиксировано увеличение содержания Bi в поверхностных слоях ДО (Dauvalter 2022). Эти элементы присутствуют в виде примесей в сульфидах (например, молибденит, пирит, халькопирит, сфалерит), находящихся в составе горных пород Хибинского щелочного массива (Яковенчук и др. 1999, 326). Повышение содержания Bi фиксируется в поверхностных частях ДО озер Мурманской области и Карелии, что связано с деятельностью металлургических и энергетических предприятий (Slukovskii 2023).

В составе сульфидов присутствуют также Mo и W, которые имеют очень большие вариации

содержания в ДО исследуемых акваторий (рис. 4).

Заключение

По результатам проведенных исследований ДО на станциях Зашеечной губы и около острова Хорт можно сделать вывод, что влияние деятельности КАЭС на загрязнение примыкающих к электростанции акваторий Бабинской и Йокостровской Имандры является незначительным, основной вклад в него вносит деятельность предприятий горнодобывающего, горнообогатительного и горно-металлургического комплекса, главным образом комбината «Североникель» и ПО «Апатит». Основными загрязняющими элементами являются ТМ (Cu, Ni, Co, Zn, Cd, Pb Bi и As), а также щелочноземельные металлы (Ca и Sr). Загрязняющий эффект КАЭС сказывается только в перекачке воды из Йокостровской Имандры в Бабинскую Имандру.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Список литературы

- Барабанов, А. В., Калинина, Т. А., Киселев, А. А., Краснобаев, А. И. (1999) *Гигант в Хибинах*. М.: Руда и металлы, 288 с.
- Батурин, Г. Н., Дубинчук, В. Т., Авилова, Е. В. (2009) О минеральном составе железомарганцевых конкреций озера Байкал. *Доклады РАН*, т. 426, № 2, с. 207–211.
- Вализер, П. М., Щербакова, Е. П., Мороз, Т. Н. и др. (2012) О находках железомарганцевых конкреций в пресноводных озерах Ильменского заповедника (Южный Урал). *Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*, № 12, с. 17–19.
- Малиновский, Д. Н., Родюшкин, И. В., Щербакова, Е. П. и др. (2005) Фракционирование изотопов Fe в результате окислительно-восстановительных процессов в водоеме. *Геохимия*, № 8, с. 878–885.
- Масленникова, А. В., Удачин, В. Н., Дерягин, В. В. (2014) *Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала*. Екатеринбург: Российское историческое общество Уральского отдела РАН, 136 с.
- Маслобоев, В. А., Боровичев, Е. А., Вальеова, С. А. и др. (2020) *Современное состояние экосистемы в районе Кольской АЭС (Мурманская область)*. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 311 с.
- Сандимиров, С. С., Кудрявцева, Л. П., Даувальтер, В. А. и др. (2019) *Методы экологических исследований водоемов Арктики*. Мурманск: Изд-во Мурманского государственного технического университета, 180 с.
- Минин, В. А. (2017) Состояние и перспективы развития электроэнергетики Мурманской области. *Труды Кольского научного центра РАН*, т. 8, № 8 (15), с. 7–15.
- Моисеенко, Т. И. (2002) *Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра*. М.: Наука, 403 с.
- Даувальтер, В. А., Сандимирова, С. С., Денисов, Д. Б. и др. (2023) *Экологическое состояние озера Имандра: в 2 томах. Т. 1: Гидролого-геохимические условия*. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 221 с.
- Пальчик, Н. А., Григорьева, Т. Н., Мороз, Т. Н. и др. (2009) Комплексное исследование марганцевых минералов донных отложений Охотского моря. *Фундаментальные основы современного материаловедения*, т. 6, № 4, с. 73–80.

- Моисеенко, Т. И., Родюшкин, И. В., Даувальтер, В. А., Кудрявцева, Л. П. (1996) *Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера)*. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 263 с.
- Яковенчук, В. Н., Иванюк, Г. Ю., Пахомовский, Я. А., Меньшиков, Ю. П. (1999) *Минералы Хибинского массива*. М.: Земля, 326 с.
- Dauvalter, V., Slukovskii, Z., Denisov, D., Guzeva, A. A. (2022) Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake Pollution. *Water*, vol. 14, no. 24, article 4044. <https://doi.org/10.3390/w14244044>
- Davison, W. (1993) Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Reviews*, vol. 34, no. 2, pp. 119–163. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(93\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(93)90029-7)
- Håkanson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control — a sedimentological approach. *Water Research*, vol. 14, pp. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Slukovskii, Z. (2023) Geochemical indicators for paleolimnological studies of the anthropogenic influence on the environment of the Russian Federation: A review. *Water*, vol. 15, no. 3, article 420. <https://doi.org/10.3390/w15030420>
- Slukovskii, Z. (2023) Uranium in lake sediments of humid zone: A case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia). *Water*, vol. 15, no. 7, article 1360. <https://doi.org/10.3390/w15071360>
- Slukovskii, Z. (2023) Vanadium in modern sediments of urban lakes in the north of Russia: Natural and anthropogenic sources. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 197, article 115754. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115754>

References

- Barabanov, A. V., Kalinina, T. A., Kiselev, A. A., Krasnobaev, A. I. (1999) *Giant in the Khibiny*. Moscow: Ruda i metally Publ., 288 p. (In Russian)
- Baturin, G. N., Dubinchuk, V. T., Avilova, E. V. (2009) On the mineral composition of ferromanganese concretions of Lake Baikal. *Doklady RAN*, vol. 426, no. 2, pp. 207–211. (In Russian)
- Dauvalter, V. A., Sandimirova, S. S., Denisov, D. B. et al. (2023) *Ecological state of Lake Imandra: in 2 volumes. Vol. 1: Hydrological and geochemical conditions*. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 221 p. (In Russian)
- Dauvalter, V., Slukovskii, Z., Denisov, D., Guzeva, A. A. (2022) Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake Pollution. *Water*, vol. 14, no. 24, article 4044. <https://doi.org/10.3390/w14244044> (In English)
- Davison, W. (1993) Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Reviews*, vol. 34, no. 2, pp. 119–163. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(93\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(93)90029-7) (In English)
- Håkanson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control — a sedimentological approach. *Water Research*, vol. 14, pp. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (In English)
- Malinovskij, D. N., Rodyushkin, I. V., Shcherbakova, E. P. et al. (2005) Fractionation of Fe isotopes as a result of redox processes in a basin. *Geokhimiya*, no. 8, pp. 878–885. (In Russian)
- Maslennikova, A. V., Udachin, V. N., Deryagin, V. V. (2014) *Paleoecology and geochemistry of lake sedimentation of the Holocene of the Urals*. Yekaterinburg: Russian Historical Society of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 136 p. (In Russian)
- Masloboev, V. A., Borovichev, E. A., Valeeva, S. A., et al. (2020) *Current conditions of ecosystems in the area surrounding Kola Nuclear Power Plant (Murmansk region, Russia)*. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 311 p. (In Russian)
- Minin, V. A. (2017) State and prospects for the development of electric power industry in the Murmansk region. *Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 8, no. 8 (15), pp. 7–15. (In Russian)
- Moiseenko, T. I. (2002) *Anthropogenic modifications of the ecosystem of Lake Imandra*. Moscow: Nauka Publ., 403 p. (In Russian)
- Moiseenko, T. I., Rodyushkin, I. V., Dauvalter, V. A., Kudryavtseva, L. P. (1996) *Formation of water and sediment quality under anthropogenic loads on water bodies of the Arctic basin (using the Kola North as an example)*. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 263 p. (In Russian)
- Palchik, N. A., Grigorieva, T. N., Moroz, T. N. et al. (2009) Comprehensive study of manganese minerals of the bottom sediments of the Okhotsk Sea. *Basic Problems of Material Science*, vol. 6, no. 4, pp. 73–80. (In Russian)
- Sandimirov, S. S., Kudryavtseva, L. P., Dauvalter, V. A., et al. (2019) *Methods of environmental studies of Arctic water bodies*. Murmansk: Murmansk State Technical University Publ., 180 p. (In Russian)
- Slukovskii, Z. (2023) Geochemical indicators for paleolimnological studies of the anthropogenic influence on the environment of the Russian Federation: A review. *Water*, vol. 15, no. 3, article 420. <https://doi.org/10.3390/w15030420> (In English)
- Slukovskii, Z. (2023) Uranium in lake sediments of humid zone: A case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia). *Water*, vol. 15, no. 7, article 1360. <https://doi.org/10.3390/w15071360> (In English)

- Slukovskii, Z. (2023) Vanadium in modern sediments of urban lakes in the north of Russia: Natural and anthropogenic sources. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 197, article 115754. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115754> (In English)
- Valizer, P. M., Shcherbakova, E. P., Moroz, T. N. et al. (2012) About the Finds of Ferromanganese concretions in the Freshwater Lakes of the Ilmensky Reserve (Southern Urals). *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, no. 12, pp. 17–19. (In Russian)
- Vokueva, S. I., Denisov, D. B. (2022) Spatial and temporal dynamics of diatom assemblages of Lake Imandra (Russia, Murmansk region). *Issues of Modern Algology*, no. 2 (29), pp. 75–82. [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2022-2\(29\)-75-82](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2022-2(29)-75-82) (In Russian)
- Yakovenchuk, V. N., Ivanyuk, G. Yu., Pakhomovsky, Ya. A., Menshikov, Yu. P. (1999) *Minerals of the Khibiny Massif*. Moscow: Zemlya Publ., 326 p. (In Russian)