

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ КОЛЬСКОЙ АЭС НА СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОЗЕРЕ ИМАНДРА

Сандимиров С. С.

## INFLUENCE OF THE SERVICE WATER SYSTEM AT THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT ON THE HEAVY METALS CONTENT IN LAKE IMANDRA

Sandimirov S. S.

### Аннотация

**Введение.** В Мурманской области на территории водосбора озера Имандра, одного из крупных озер Северо-Запада Российской Федерации, создан мощный многоотраслевой комплекс, включающий в себя горнорудные и металлургические предприятия, промышленные и энергетические объекты. Многолетнее использование водных ресурсов для промышленных и питьевых нужд негативно сказалось на состоянии экосистемы озера. Целью исследования был анализ состояния природных вод в районе деятельности Кольской АЭС. **Методы.** В работе приведены измеренные гидрохимические данные, характеризующие плес Бабинская Имандра, а также динамика их развития в плесе Йокостровская Имандра. **Результаты.** Выявлено антропогенное влияние технического водоснабжения Кольской АЭС на качество вод плеса озера Имандра (Бабинская Имандра). Современные результаты исследований сопоставлены с содержанием загрязняющих веществ в предыдущие годы. Показана роль природных факторов, влияющих на качество поверхностных вод — осадков и подземных вод. **Заключение.** Среди микроэлементов, загрязняющих экосистему южного плеса озера Имандра и концентрация которых зависит непосредственно от существующей схемы технического водоснабжения, выявлены специфичные тяжелые металлы — медь и никель.

**Ключевые слова:** озеро Имандра, Кольская АЭС, водоснабжение, гидрохимия, загрязняющие вещества.

### Abstract

**Introduction.** A powerful multi-sector complex including mining and iron-and-steel enterprises, industrial and power facilities is located in the Murmansk region, in the catchment area of Lake Imandra, which is one of the largest lakes in the North-West of Russia. The long-term use of water resources for industrial and drinking needs took a heavy toll on the lake ecosystem. The purpose of the study is to analyze the state of natural waters in the Kola NPP area. **Methods.** The paper presents the measured hydrochemical data characterizing the Babinskaya Imandra reach, as well as the dynamics of changes in these indicators in the Yokostrovskaya Imandra reach. **Results.** The anthropogenic influence of the service water system at the Kola NPP on the quality of Lake Imandra reach (Babinskaya Imandra) waters is revealed. The study results are compared with the data on the pollution content for previous years. The role of natural factors affecting the surface water quality — i. e. precipitation and groundwater — is shown. **Conclusion.** Among the trace elements polluting the ecosystem of the southern reach of Lake Imandra, the concentration of which depends directly on the existing service water system, specific heavy metals — copper and nickel — have been identified.

**Keywords:** Lake Imandra, Kola NPP, water supply, hydrochemistry, pollutants.

### Введение

Энергетика — один из источников негативного воздействия на окружающую среду. Энергетические объекты (энергетическая отрасль в целом и атомные электростанции как объекты энергетики, в частности) по степени влияния на окружающую природную среду принадлежат к числу наиболее интенсивно воздействующих на биосферу. При этом наибольшей нагрузке подвергаются экосистемы природных водоис-

точников, используемых в качестве охлаждающих водоемов. Охлаждающие водоемы, наряду с поступлением теплых вод, подвергаются также загрязнению химическими веществами, попадающими в них с промышленными и хозяйственными сточными водами и аэрозольными выбросами в атмосферу. Дальнейшая деятельность атомной энергетики должна осуществляться только в том случае, если технология АЭС положительно влияет не только на экономику, но и на безопасность,

на эффективное управление отходами и низкий риск их распространения [21].

На берегах оз. Имандра сосредоточена наибольшая концентрация основных промышленных производств Мурманской области. Здесь находятся крупнейший комбинат по добыче и переработке апатитонелефиновых месторождений, медно-никелевое и железорудное производство, построена атомная электростанция на прямоточной системе охлаждения. Также надо учитывать, что в 1952 г. оз. Имандра было зарегулировано плотиной ГЭС «Нива-1» и по сути является водохранилищем. На территории водосбора проживает около 176,9 тыс. человек, что составляет 23,6 % от общего числа жителей Мурманской области (на 2019 г.), и человек внес весомый вклад в загрязнение водоема в результате своей хозяйственной деятельности. По всему восточному берегу проходит построенная в 1916 г. железная дорога, а само озеро пересекает федеральная автомобильная трасса. Более 70 лет озеро — источник технического и питьевого водоснабжения — используется в интересах туризма и в рекреационных целях, около 50 лет велся рыбный промысел.

До строительства Кольской АЭС сточные воды предприятий не затрагивали юго-восточного плеса оз. Имандра — Бабинской Имандры, что обеспечивало отличие в гидрохимическом режиме различных акваторий водоема. С 1973 г. в связи с началом работы станции в Бабинской Имандре происходит ряд существенных изменений, которые можно обозначить как комплексное техногенное воздействие сбросных вод АЭС на водоем. Кольская АЭС является одним из крупнейших водопользователей Мурманской области, на станции применяется прямоточная система охлаждения реакторов и забор воды, объем которой ежегодно составляет более 1 млрд кубометров, осуществляется из плеса Йокостровская Имандра, а сброс подогретых вод — в губу Молочную Бабинской Имандры. Полный объем оз. Имандра составляет около 10 км<sup>3</sup>. Сточные воды непосредственно с территории АЭС на химический состав природных вод в губе Молочной значительного влияния не оказывали. В современный период в рамках экологической программы предприятия началась эксплуатация новой системы ультрафиолетового обеззараживания сточных

вод без использования химических реагентов, так как внутреннее потребление Кольской АЭС на хозяйственно-бытовые нужды составляет около 700 тыс. кубометров воды в год.

Сток загрязнений, поступающих в оз. Имандра, имеет выраженное направление с севера на юг (из Большой Имандры в Йокостровскую Имандру) к стоку из оз. Имандра — реке Нива. В северную часть озера — Большую Имандру — поступают сточные воды горно-перерабатывающих предприятий. АО «Кольская ГМК» (комбинат «Североникель») загрязняет озеро тяжелыми металлами (никель, медь, кобальт), флотореагентами, сульфатами и др., АО «Апатит» — мелкодисперсными апатитонелефиновыми взвешиваемыми флотореагентами, фенолами, хлоридами, сульфатами. Мелкие предприятия также загрязняют водоем. Общий объем недостаточно очищенных сточных вод на момент исследований составлял 114,0 млн м<sup>3</sup> [16]. До 1995 г. Африкандское рудоуправление сбрасывало сточные воды в губу Зашеечная плеса Йокостровская Имандра, которая находится на расстоянии около 11 км от водозабора Кольской АЭС. В настоящее время в большом количестве поступают хозяйственные стоки из Мончегорска, Апатитов, Кировска и других населенных пунктов, расположенных на территории водосбора.

Учитывая длительность и весь комплекс антропогенного влияния на поверхностные воды и ранее проводились исследования по разносторонней оценке экологического состояния оз. Имандра [9, 12, 14]. Более поздние обширные исследования проводились в период снижения и стабилизации антропогенной нагрузки, когда были определены тенденции к улучшению качества природных вод и восстановлению экосистемы [3–6, 10, 11, 13, 18, 20]. В данной работе проанализирована детальная характеристика зональных особенностей распределения микроэлементов в зоне циркулирующих потоков технологических вод Кольской АЭС в современных условиях изменения окружающей среды.

#### **Методы и материалы**

Озеро Имандра — самое большое озеро Кольского полуострова. Общая площадь водоема 880,4 м<sup>2</sup> (с островами). Площадь водосбора — 12,3 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет около 12 % от всей площади полуострова. Длина озера — 109 кило-

метров, наибольшая ширина — 18,7 километров. Озеро состоит из трех обособленных плесов: Большой Иmandры, Йокостровской Иmandры и Бабинской Иmandры. Плесы между собой соединены небольшими сужениями: Йокостровским проливом и проливом Широкая Салма. Вытекает из озера одна река — Нива. Бабинская Иmandра является наименьшим плесом по площади (191,0 км<sup>2</sup>), по длине, объему вод и числу островов, но наибольшим по средней глубине — 16,3 м [2, 7, 17, 19].

Объектом исследований являлись плес Бабинская Иmandра и западная часть плеса Йокостровская Иmandра, испытывающие прямое воздействие сбросных теплых вод Кольской АЭС. В работе детально проанализировано содержание загрязняющих веществ в поверхностных и придон-

ных водах южных плесов. В целях определения особенностей гидрохимических характеристик комплексные исследования водоема проводились с апреля по октябрь 2011 г. и в летний период 2012 г. Работы велись в районах акватории Бабинской Иmandры (губы Молочная, Камка, Кунчаст), в западной части акватории Йокостровской Иmandры (губы Зашеечная и Княжая) и на участках подводящего и отводящего каналов Кольской АЭС (рис. 1).

Пробы воды (всего 311 проб) для химического анализа отбирали с разных горизонтов батометром Рутнера (2 л). Аналитические методы, включающие химический анализ компонентов и их первичную подготовку, проводились по стандартным сертифицированным методикам выполнения измерений. Биогенные элементы

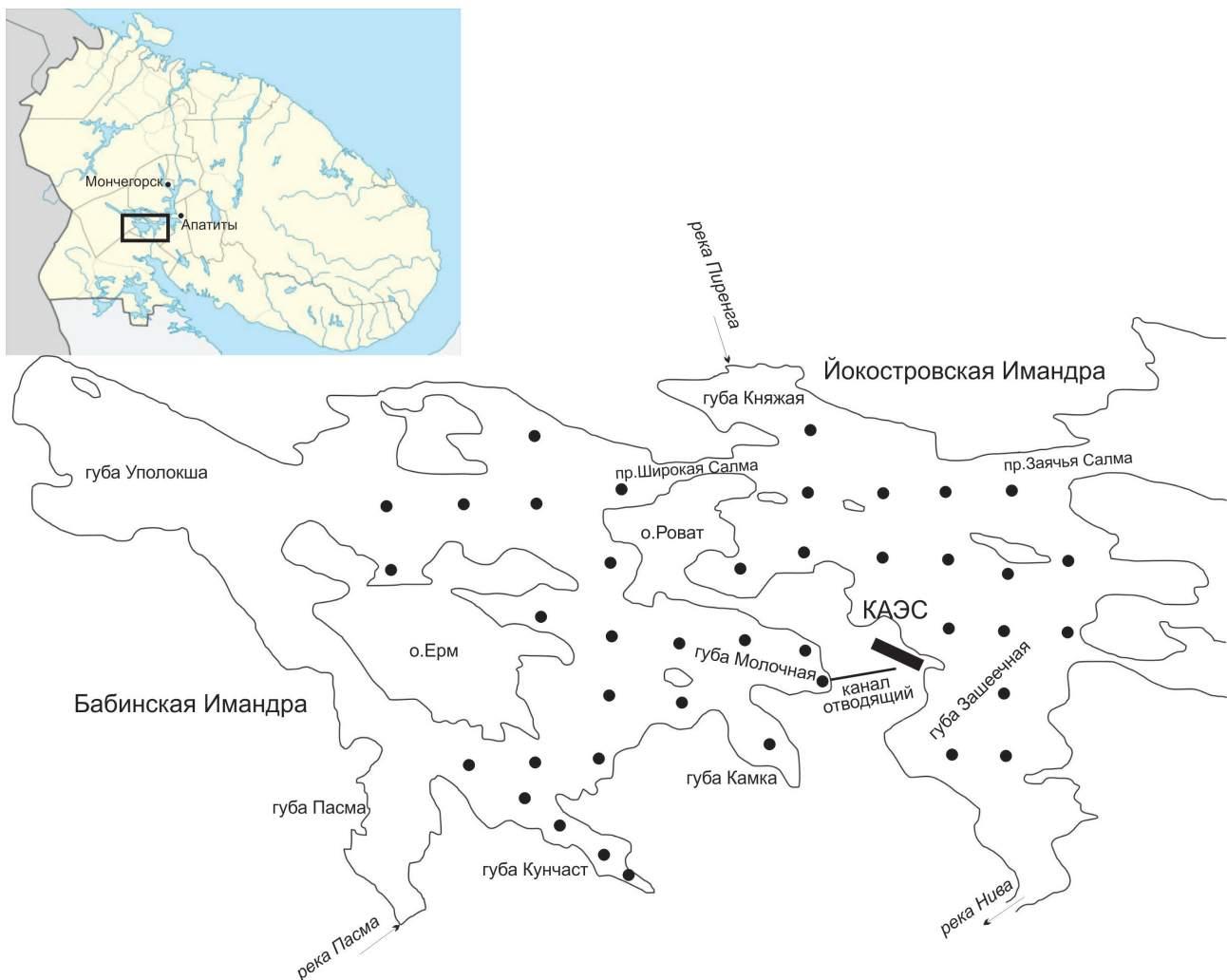


Рис. 1. Карта-схема южных плесов оз. Иmandра и станций отбора гидрохимических проб

и их формы анализировались фотометрическим методом. Для определения условно растворимых и взвешенных форм пробы фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Концентрации металлов определяли атомно-абсорбционным методом с атомизацией в графитовой печи на приборе Aanalyst 800, а также с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра Perkin-Elmer 360 в режиме пламенной атомизации.

### Результаты исследования и обсуждение

Поступление теплых вод само по себе напрямую не влияет на качество поверхностных вод, но содействует второстепенному воздействию, поскольку повышение температуры поддерживает деятельность бактерий-редуцентов и создает благоприятные условия для процессов самоочищения. На гидрохимический состав вод Бабинской Имандры прямое воздействие оказывает Кольская АЭС в результате перекачки через системы охлаждения уже загрязненных промышленными и хозяйственными отходами вод. В зонах подогрева поверхностных вод некоторых АЭС на территории Российской Федерации наблюдается рост численности биогенных соединений, показателя БПК и органических веществ, свидетельствующих о явлениях эвтрофикации. Но в ряде случаев отчетливых изменений в структуре биогенных элементов под влиянием сброса теплых вод не наблюдается [15]. Такая же ситуация отмечена и для Бабинской Имандры. Озеро Имандра тектонического происхождения, а как отмечалось выше, плес Бабинская Имандра отличается наибольшей средней глубиной и является областью разгрузки подземных вод кристаллических пород и четвертичных отложений. Поэтому теплые воды распространяются на небольшое расстояние — район акватории теплых вод расположен на расстоянии от 2,3 до 5,4 км от устья отводящего канала. Границы этой зоны весьма условны, так как они подвижны и зависят от режима работы АЭС, каскада Нивских ГЭС, метеорологических условий и т. д. Надо отметить, что при исследованиях в 1984 г., когда был введен в строй четвертый (и последний) реактор Кольской АЭС, зона распространения теплых вод также ограничивалась 2,5 км, за пределами которой их влияние было незначительным [9]. Большую роль здесь также играет и климат —

за последние 20 лет среднегодовая температура воздуха на исследуемой территории составила +1,6°C. Кольская АЭС расположена за Полярным Кругом, и для всех водоемов этой климатической зоны характерны невысокие значения летней температуры поверхностных слоев воды — 16–18 °С, но перед устьевым участком отводящего канала КАЭС температура озерных вод поднимается до 27 °С.

До начала эксплуатации КАЭС гидрохимический режим юго-западной части оз. Имандра был типичен для большинства водоемов Кольского Севера и определялся в основном качеством втекающих рек и подземных вод (табл. 1) и в незначительной мере — трансграничным переносом [1, 8, 19]. В настоящее время основными веществами, загрязняющими оз. Имандра и южные плесы соответственно, являются тяжелые металлы: никель, медь, алюминий, стронций, марганец. Антропогенный источник поступления никеля и меди — деятельность медно-никелевого комбината в г. Мончегорске, расположенного в 52 км от АЭС (см. рис. 1). Расстояние, которое преодолевает по озеру водный поток от места сброса сточных вод комбината до подводящего канала АЭС, составляет 74 км. Стронций и алюминий — компоненты сточных вод АО «Апатит». Загрязненные воды с естественным стоком из озера преодолевают около 40 км до поступления в подводящий канал АЭС и далее в Бабинскую Имандру.

К южной части акватории оз. Имандра содержание основных загрязняющих веществ (никеля и меди) снижается за счет разбавления массами озерной воды и впадающих рек, а также быстрым водообменом. Полный водообмен озера происходит приблизительно за 2 года. Значительные отличия в гидрохимических параметрах, по сравнению с местом забора технологических вод АЭС, наблюдаются в восточной части губы Зашеечная и ее южной части, в районе стока из оз. Имандра, преимущественно под влиянием потоков загрязненных вод из северных плесов — Большой и Йокостровской Имандры.

Большая часть территории водосборного бассейна оз. Имандра входит в состав Балтийского гидрогеологического массива. Подземные воды относятся к зоне свободного водообмена, которая формируется под влиянием дренирующего

Таблица 1

**Содержание основных загрязняющих веществ в плесах оз. Имандра**  
(в числителе — медиана, в знаменателе — мин.-макс.)

Период	Ni, мкг/л	Cu, мкг/л	Al, мкг/л	Sr, мкг/л	Mn, мкг/л
Йокостровская Имандра (западная часть)					
1972–1974	<u>4,0</u> 2,0–10,0	<u>1,5</u> 1,1–2,5	–	–	–
1983–1992	<u>20,0</u> 3,2–31,0	<u>5,0</u> 2,0–8,0	<u>22,0</u> 7,0–85,0	<u>45,5</u> 30,0–55,0	<u>1,0</u> 1,0–9,0
1993–2003	<u>3,6</u> 1,0–17,5	<u>2,6</u> 1,8–6,4	<u>14,0</u> 4,0–30,9	<u>55,5</u> 33,0–72,0	<u>2,1</u> 0,5–23,0
2011–2012	<u>2,5</u> 1,3–4,8	<u>2,4</u> 1,6–5,3	<u>21,0</u> 12,0–63,0	<u>57,0</u> 47,0–66,0	<u>3,6</u> 1,8–37,0
Бабинская Имандра					
1972–1974	<u>4,9</u> 2,0–5,0	<u>1,8</u> 1,0–4,0	–	–	–
1983–1992	<u>8,5</u> 1,2–33,0	<u>4,0</u> 0–50,0	<u>20,0</u> 0–112,0	<u>34,0</u> 5,0–50,0	<u>1,0</u> 0–11,0
1993–2003	<u>2,1</u> 1,2–32,0	<u>2,5</u> 1,8–12,1	<u>16,9</u> 2,9–77,0	<u>46,0</u> 24,0–66,0	<u>1,3</u> 0,2–23,2
2011–2012	<u>1,7</u> 1,1–6,3	<u>2,7</u> 1,9–14,0	<u>18,0</u> 10,0–55,0	<u>49,0</u> 43,0–60,0	<u>1,8</u> 1,0–8,1

воздействия речной сети и климатических факторов. Основное снабжение подземных вод осуществляется за счет выпадающих атмосферных осадков (табл. 2).

В настоящее время содержание загрязняющих веществ в районе влияния теплых вод Кольской АЭС зависит:

- от химического состава вод в районе водозабора АЭС, которые, пройдя технологический цикл, сбрасываются в губу Молочную;
- сточных вод самой АЭС.

*Никель* — один из наиболее распространенных загрязняющих веществ в оз. Имандра. В пе-

риод исследований его содержание в отводящем канале колебалось от 1,1 до 2,4 мкг/л, составляя в среднем за год 2,2 мкг/л, в подводящем — от 1,3 до 2,5 мкг/л, составляя в среднем 2,1 мкг/л (рис. 2), т. е. его максимальные значения на исследуемой акватории озера в 2 раза превышали фоновое содержание элемента на территории Кольского п-ова (1 мкг/л). В пробах воды из Бабинской и Йокостровской Имандры концентрация никеля во всей водной толще была выше фоновых значений и изменялась от 1,1 до 6,3 мкг/л, составляя в среднем 2,2 мкг/л. Даже в период интенсивного снеготаяния никель попадает в водоем с талыми водами из загрязненного аэротехногенным путем снежного покрова в незначительных количествах (см. табл. 2).

По мере распространения потока теплых вод в Бабинской Имандре содержание никеля в водной среде снижается. Это указывает на преимущественное его поступление со сбросными водами Кольской АЭС. Анализ распространения никеля по акватории губы Молочной и далее по плесу показывает, что наибольшие его количества находятся в придонных слоях.

Максимальные концентрации никеля отмечены в Йокостровской Имандре, вдоль восточного берега губы Зашеечная, и вблизи стока из оз. Имандра. Следует отметить, что за последнее

Таблица 2

**Гидрохимическая характеристика осадков и подземных вод на территории водосбора оз. Имандра (среднее значение)**

Период	pH	Ni, мкг/л	Cu, мкг/л	Al, мкг/л	Sr, мкг/л	Mn, мкг/л
Снег						
1996–2010	4,93	2,4	2,3	22	4,6	3,4
Дождевые осадки						
1996–2010	4,97	10,3	15,6	114	6,4	12,8
Грунтовые и подземные воды – Хибиньы						
1997–2009	8,12	0,6	0,6	260	49	0,5
Подземные воды — западная часть водосбора						
2000	7,68	68	25	40	569	219



Рис. 2. Содержание никеля (мкг/л) в пелесах оз. Имандра

время содержание никеля в Бабинской Имандре снизилось: среднее значение в 1978 г. составляло 4,7 мкг/л; в 1979 г. — 4,8 мкг/л; в 1984 г. — 13,1 мкг/л; в 1985 г. — 24,3 мкг/л; в 1990 г. — 10,9 мкг/л; в 2001 г. — 2,1 мкг/л. В целом в течение последнего десятилетия содержание никеля в пелесах Бабинская и Йокостровская Имандра находится на постоянном уровне и в зависимости от концентрации в том или ином районе водоема отличается незначительно.

*Медь* в природных водах плесов содержится в количествах от 2,0 до 7,2 мкг/л. Снижение концентрации меди происходит медленно по направлению движения загрязненного потока из Большой Имандры к югу, но в придонных слоях плеса Йокостровская Имандра, ближе к стоку из озера, концентрация меди в летний период может достигать высоких значений — до 25 мкг/л.

В период исследований содержание меди в отводящем канале изменялось от 2,9 до 4,2 мкг/л, составляя в среднем за год 3,6 мкг/л, в подводящем канале — от 1,6 до 3,8 мкг/л, составляя в среднем 2,4 мкг/л (рис. 3), т. е. концентрации меди в отдельные сезоны года в подводящем канале оказывались ниже, чем в отводящем при их поступлении в губу Молочная.

В Бабинской Имандре высокие концентрации меди наблюдались в летний период к югу от ос-

трова Ерм, что может быть связано с аэротехногенным переносом от комбината АО «Кольская ГМК». Среднее значение концентрации меди (3,0 мкг/л) во все сезоны года превышало фоновую концентрацию, которая для водоемов Кольского п-ова составляет 1 мкг/л.

*Алюминий* является одним из самых распространенных элементов в земной коре и содержится практически в любой природной воде, но в оз. Имандра попадает со сточными водами АО «Апатит». После прохождения процессов флотации алюминий в составе тонко измельченных частиц нефелина поступает в губу Белую (пес Большая Имандра) при фильтрации сквозь дамбы хвостохранилищ обогатительных фабрик, а также аэротехногенным путем на территорию водосбора за счет их пыления в летний период.

В период 1993–2000 гг. наметилась тенденция к снижению содержания алюминия в водоеме, но результаты последних исследований показывают, что современное содержание алюминия в южных плесах соответствует содержанию, которое наблюдалось в период стабильной работы промышленных предприятий (см. табл. 1). Максимальное значение алюминия в Бабинской Имандре отмечено в отводящем канале в осенний период – 55 мкг/л. В целом в течение года в водной среде губы Молочной алюминий содер-



Рис. 3. Содержание меди (мкг/л) в плесах оз. Имандра

жится в незначительных количествах: от 11 до 26 мкг/л, составляя в среднем 17 мкг/л, что ниже принятых условно-фоновых значений для Кольского п-ова ( $Al < 30$  мкг/л). Во время исследований концентрация алюминия в поверхностных и придонных слоях на всей акватории плеса Бабинская Имандра изменялась от 10 до 46 мкг/л,

составляя в среднем за год 19 мкг/л, в Йокостровской Имандре — от 12 до 63 мкг/л, составляя в среднем 25 мкг/л (рис. 4).

*Стронций* в водной среде плесов оз. Имандра содержится в количествах от 43 до 66 мкг/л, составляя в среднем 52 мкг/л (рис. 5). Максимальные концентрации отмечены в придонных слоях



Рис. 4. Содержание алюминия (мкг/л) в плесах оз. Имандра

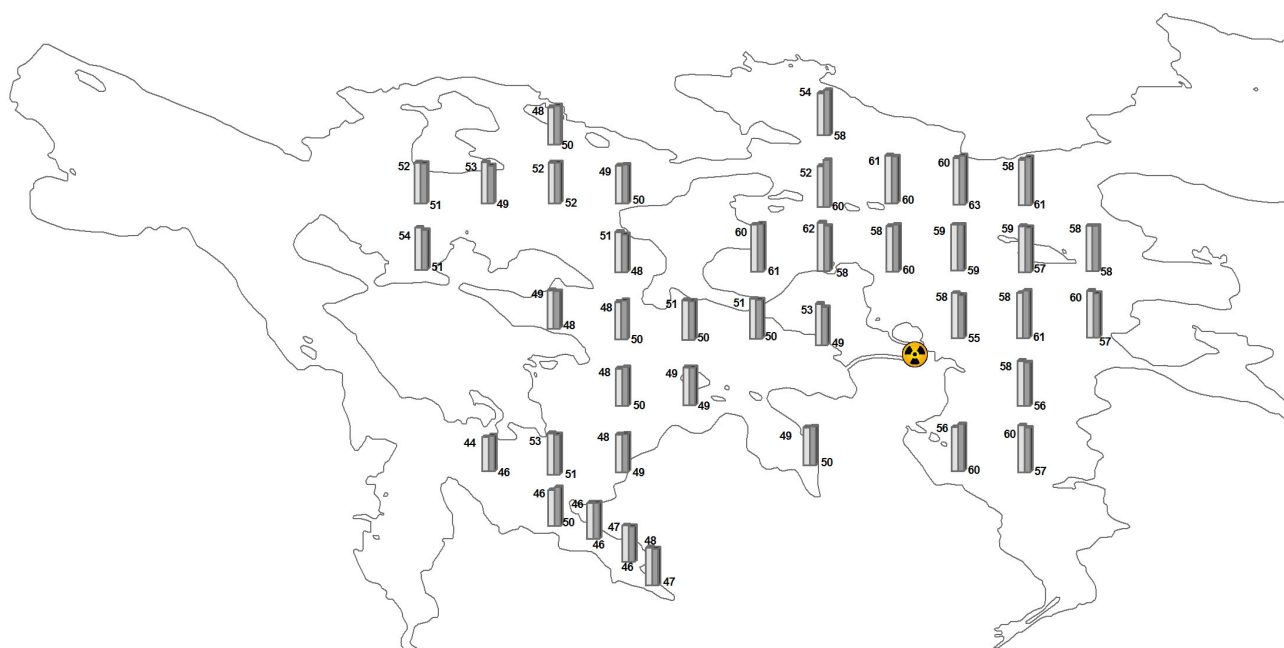


Рис. 5. Содержание стронция (мкг/л) в плесах оз. Имандра

Йокостровской Имандры. Сопоставление содержания стронция в оз. Имандра с принятыми условно-фоновыми значениями ( $Sr < 26$  мкг/л) показывает, что в последние годы содержание стронция на всей акватории озера превышает эту величину. В период 1986–1992 гг. эта величина составляла 43 мкг/л (макс. — 57 мкг/л, мин. — 34 мкг/л). Таким образом, загрязнение озера стронцием продолжает нарастать.

*Марганец* в поверхностные воды поступает в результате выщелачивания руд и других минералов, содержащих марганец. В оз. Имандра соединения марганца вносятся также со сточными и шахтными водами промышленных предприятий, но их влияние распространяется не так далеко по акватории. Главная форма миграции соединений марганца в поверхностных водах — взвеси, состав которых определяется составом пород и дренируемых вод. Ввиду слабого выщелачивания пород в оз. Имандра в поверхностных слоях содержится незначительное количество марганца: от 1,0 до 13,0 мкг/л, составляя в среднем 3,0 мкг/л (рис. 6). Максимальные концентрации отмечены в придонных слоях северной части Йокостровской Имандры — до 25–37 мкг/л, в поверхностных слоях на этих станциях концентрация составляет 2,5–2,7 мкг/л. В настоящее время в южных плесах концентрация марганца нахо-

дится ниже принятой условно-фоновой для озер Кольского п-ова — 5,5 мкг/л.

Концентрации марганца в поверхностных водах подвержены сезонным колебаниям. Концентрации в летний период на станциях отбора проб, находящихся на значительном удалении от АЭС и расположенных в районах впадения крупных притоков (реки Пасма и Пиренга), иногда превышают концентрации в осенний период в 2–3 раза. Осеннее понижение концентрации ионов марганца в природных водах Йокостровской, а затем и Бабинской Имандры происходит в результате реакции окисления, основные параметры которой температура, концентрация растворенного кислорода и величина рН.

Факторами, также определяющими изменения концентраций марганца, являются соотношение между поверхностным и подземным стоком, интенсивность потребления его при фотосинтезе, разложение фитопланктона, микроорганизмов и высшей водной растительности, а также процессы осаждения его на дно водоемов.

Дополнительно были рассмотрены концентрации ртути и свинца, во всех пробах их содержание менее 0,5 мкг/л, т. е. ниже предела их количественного определения.

Для оценки влияния факторов в процессах формирования гидрохимического состава

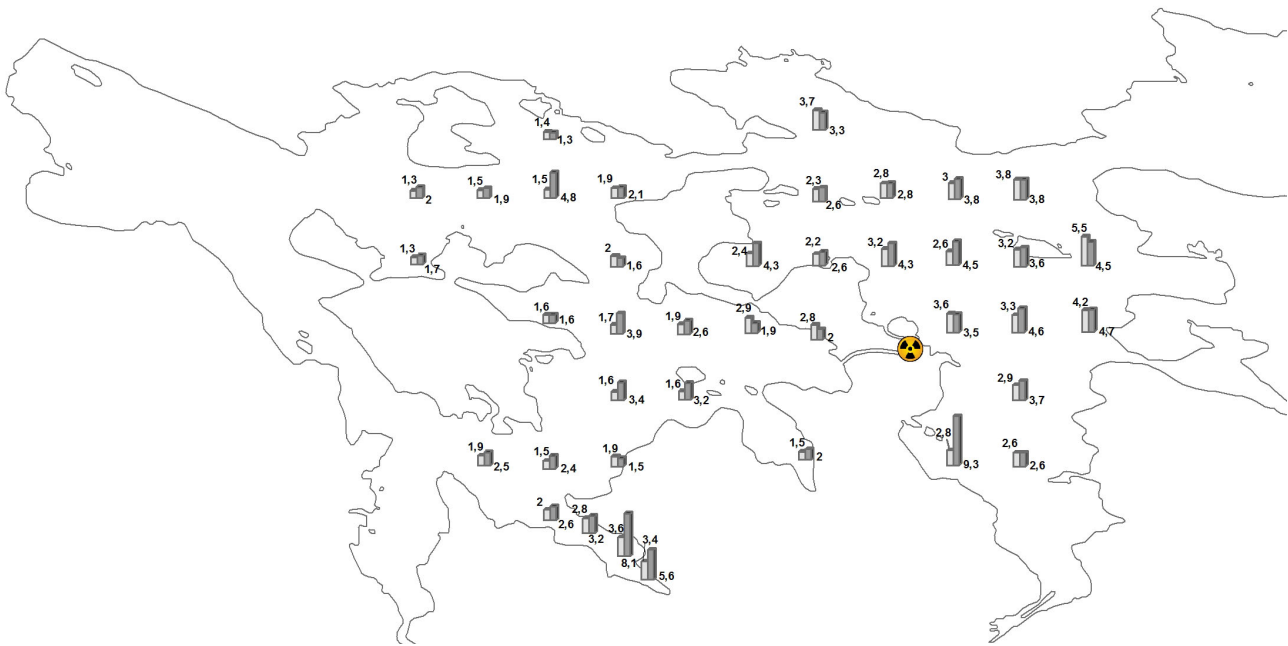


Рис. 6. Содержание марганца (мкг/л) в плесах оз. Имандра

вод был проведен факторный анализ методом главных компонент. В результате анализа выделено два основных фактора, показывающих наибольшие проценты объяснимой дисперсии: 1 — 35,4 %; 2 — 17,6 %. Первый фактор непосредственно связан с региональными особенностями формирования химического состава вод, которые предопределены природными и климатическими условиями. Содержание главных ионов обусловлено, в первую очередь, слагающими территорию водосбора горными породами. Этот фактор определяет также зональное содержание Sr, который содержится в горных породах. Гумификация почв на водосборной площади и короткий промывной режим в плесах обеспечивают равномерное содержание Mn на исследуемой акватории оз. Имандра. Второй фактор обусловлен локальной антропогенной нагрузкой, в данном случае за счет перекачки вод Кольской АЭС, природными процессами обогащения вод специфическими гумусовыми веществами, которые широко распространены в торфянистых и болотных почвах на территории водосборной площади.

На основании факторного анализа можно расположить факторы и процессы по степени их воздействия на химический состав вод: 1) региональные особенности (близость незамерзающего Баренцева моря, процессы гумификации); 2) ло-

кальные факторы, как антропогенные, связанные с близостью промышленных предприятий, так и природные. Если рассматривать уровень отличий в химическом составе вод между плесами Бабинская Имандра и Йокостровская Имандра, то по распределению основных микроэлементов они достаточно близки.

#### Заключение

Учитывая весь комплекс влияния и условия распространения теплых вод по акватории оз. Имандра, их воздействие на различные компоненты экосистемы, а также изменение естественных течений в озере, можно предположить наличие циркуляционного потока между южными плесами через пролив Большая Салма, который наиболее выражен в зимний и весенний периоды за счет сработки вод каскадом Нивских ГЭС. В этот период в проливе Широкая Салма наблюдается слабое транзитное течение — до 2–3 см/с. Перепад уровней в течение года в оз. Имандра составлял в 2011 г. — 0,75 м, в 2012 г. — 1,19 м.

На основании проведенных исследований в 2011–2012 гг. можно сделать заключение, что в губу Молочную по отводящему каналу поступает вода, качественный состав которой уже не так сильно отличается от современных природных свойств плеса Бабинская Имандра. На основании детального анализа химических свойств вод

оз. Имандра можно выделить специфичные маркеры среди микроэлементов, указывающих на косвенное влияние существующей схемы технического водоснабжения Кольской АЭС на экосистему плесов Бабинская и Йокосторовская Имандра, — это медь и никель. Эти металлы в большом количестве поступают только в северную часть озера и их распространение по акватории Бабинской Имандры, как обособленного плеса, полностью зависит от перекачки технологических вод Кольской АЭС. Данная проблема, на наш взгляд, может быть решена переходом технологической схемы водоснабжения АЭС с прямоточной системы охлаждения на замкнутую.

Работа выполнена в рамках темы НИР (№ 0226-2019-0045) и хоздоговора «Анализ влияния технического (циркуляционного) водоснабжения Кольской АЭС на экосистему оз. Имандра».

#### Литература

1. Алекин, О. А. (1970). Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 444 с.
2. Верещагин, Г. Ю. (1930). Методы морфометрической характеристики озер. В: Труды Олонецкой научной экспедиции, Ч. 2, География, Вып. 1. Л.: Государственный гидрологический институт, 115 с.
3. Даувальтер, В. А. и Кашулин, Н. А. (2013). Долговременные изменения химического состава донных отложений озера Имандра в зоне влияния стоков Кольской атомной электростанции. В: Труды Кольского научного центра РАН. Изд-во КНЦ РАН: Апатиты, № 3 (16), сс. 6–35.
4. Даувальтер, В. А. и Кашулин, Н. А. (2018). Распределение фоновых содержаний элементов в донных отложениях озера Имандра. Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та, Т. 21, № 1, сс. 128–138.
5. Денисов, Д. Б., Валькова, С. А., Терентьев, П. М., Сандимиров, С. С. и Вандыш, О. И. (2017). Современное состояние экосистемы озера Имандра в зоне влияния Кольской АЭС (Мурманская область). Вода: химия и экология, № 6, сс. 41–51.
6. Евдокимова, Г. А. (ред.) (2010). Экологическое состояние наземных и водных экосистем в районе Кольской АЭС. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 227 с.
7. Елшин, Ю. А. и Куприянов, В. В. (ред.) (1970). Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 1. Кольский полуостров. Л.: Гидрометеоздат, 316 с.
8. Израэль, Ю. А. (ред.) (1987). Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ. Л.: Гидрометеоздат, 303 с.
9. Крючков, В. В., Моисеенко, Т. И. и Яковлев, В. А. (1985). Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 131 с.
10. Моисеенко, Т. И. (ред.) (2002). Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 403 с.
11. Моисеенко Т. И. и Денисов Д. Б. (2019). Возможно ли восстановление озерной арктической экосистемы после длительного загрязнения? Арктика: экология и экономика, № 4 (36), сс. 16–25.
12. Моисеенко, Т. И. и Яковлев, В. А. (1990). Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 219 с.
13. Моисеенко, Т. И., Кудрявцева, Л. П. и Гашкина, Н. А. (2006) Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 261 с.
14. Моисеенко, Т. И., Яковлев, В. А. и Крючков, В. В. (1984). Воздействие подогретых вод Кольской АЭС на гидрологический и гидрохимический режим губы Молочной озера Имандра. Апатиты: Фонды Кольского филиала АН СССР, 124 с.
15. Мордухай-Болтовской, Ф. Д. (1975). Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов (озер). В: Экология организмов водохранилищ-охладителей. Труды Института биологии внутренних вод АН СССР, Вып. 27 (30). Л.: Наука, сс. 7–69.
16. Правительство Мурманской области (2012). Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2011 году. [online] Доступно по ссылке: [https://gov-murman.ru/upload/iblock/88a/2011\\_.pdf](https://gov-murman.ru/upload/iblock/88a/2011_.pdf) [Дата обращения: 18.11.2019].
17. Рихтер, Г. Д. (1934). Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. Л.: Государственное технико-теоретическое издательство, 144 с.
18. Сандимиров, С. С., Кудрявцева, Л. П. и Петрова, О. В. (2017). Современное состояние гидрохимических показателей южных плесов озера Имандра. Вода: химия и экология, № 2, сс. 9–19.
19. Семенович, Н. И. (1940). Гидрологические исследования озера Имандра. В: Материалы к изучению поверхностных вод Кольского полуострова. Апатиты: Фонды Кольского филиала АН СССР, 406 с.
20. Moiseenko, T. I., Dinu, M. I., Gashkina, N. A. and Kremleva, T. A. (2019). Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and Western Siberia. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 6, 065010. DOI: 10.1088/1748-9326/ab17ea.
21. Beckjord, E. (ed.) (2003). The future of nuclear power. An interdisciplinary MIT study. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 170 p.

#### References

1. Alekin, O. A. (1970). Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 444 p.
2. Vereshchagin, G. Yu. (1930). Methods for the morphometric analysis of lakes. In: Proceedings of the Olonets Scientific Expedition, Part 2, Geography, Issue 1. Leningrad: State Hydrological Institute, 115 p.
3. Dauvalter, V. A. and Kashulin, N. A. (2013). Long-term changes in the chemical composition of the Imandra Lake sediments within the zone of waste water influence of the Kola

nuclear power plant. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, No. 3 (16), pp. 6–35.

4. Dauvalter, V. A. and Kashulin, N. A. (2018). Distribution of background contents of elements in sediments of Lake Imandra. *Vestnik of MSTU*, Vol. 21, No. 1. pp. 128–138.
5. Denisov, D. B., Valkova, S. A., Terentev, P. M., Sandimirov, S. S. and Vandyshev, O. I. (2017). The current state of the ecosystem of Imandra Lake in the zone of influence of the Kola NPP (Murmansk region). *Water: Chemistry and Ecology*, No. 6, pp. 41–51.
6. Yevdokimova, G. A. (ed.) (2010). Ecological state of land and water ecosystems around the Kola NPS. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 227 p.
7. Yelshin, Yu. A. and Kupriyanov, V. V. (eds.) (1970). Surface water resources of the USSR. Vol. 1. The Kola Peninsula. Leningrad: Gidrometeoizdat, 316 p.
8. Israel, Yu. A. (ed.) (1987). Monitoring of the transboundary air pollutant transport. Leningrad: Gidrometeoizdat, 303 p.
9. Kryuchkov, V. V., Moiseenko, T. I. and Yakovlev, V. A. (1985). Ecology of cooling ponds in polar regions. Apatity: Kola branch of the USSR Academy of Sciences, 131 p.
10. Moiseenko, T. I. (ed.) (2002). Anthropogenic modifications of the Imandra Lake ecosystem. Moscow: Nauka, 403 p.
11. Moiseenko, T. I. and Denisov, D. B. (2019). Is it possible to restore the Arctic lake ecosystems after long-term pollution? *Arctic: Ecology and Economy*, No. 4 (36), pp. 16–25.
12. Moiseenko, T. I. and Yakovlev, V. A. (1990). Anthropogenic transformations of water ecosystems of the Kola North. Leningrad: Nauka, 219 p.
13. Moiseenko, T. I., Kudryavtseva, L. P. and Gashkina, N. A. (2006). Trace elements in terrestrial surface waters: Technophylic properties, bioaccumulation, and ecotoxicology. Moscow: Nauka, 261 p.
14. Moiseenko, T. I., Yakovlev, V. A. and Kryuchkov, V. V. (1984). Influence of thermally enriched waters of the Kola Nuclear Power Plant on the hydrological and hydrochemical conditions in Molochnaya bay of Lake Imandra. Apatity: Collection of the Kola Branch of the USSR Academy of Sciences, 124 p.
15. Mordukhay-Boltovskoy, F. D. (1975). Issue of the influence of thermal and nuclear power plants on the hydrobiological conditions in water bodies (lakes). In: Ecology of the organisms of the heater waters in reservoirs. Proceedings of the Institute for the Biology of Inland Waters of the USSR Academy of Sciences, Vol 27 (30). Leningrad: Nauka, pp. 7–69.
16. Murmansk Regional Government (2012). Report on the state and environmental protection of the Murmansk region in 2011. [online] Available at: [https://gov-murman.ru/upload/iblock/88a/2011\\_.pdf](https://gov-murman.ru/upload/iblock/88a/2011_.pdf) [Date accessed 18.11.2019].
17. Rikhter, G. D. (1934). Physical and geographical study of Lake Imandra and its basin. Leningrad: State Technical and Theoretical Publishing House, 144 p.
18. Sandimirov, S. S., Kudryavtseva, L. P. and Petrova, O. V. (2017). The current state of hydrochemical indicators of the southern reaches of Lake Imandra. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 2, pp. 9–19.
19. Semenov, N. I. (1940). Hydrological studies of Lake Imandra. In: Materials for studies of surface waters on the Kola Peninsula. Apatity: Collation of the Kola Branch of the USSR Academy of Sciences, 406 p.
20. Moiseenko, T. I., Dinu, M. I., Gashkina, N. A. and Kremleva, T. A. (2019). Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and Western Siberia. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 6, 065010. DOI: 10.1088/1748-9326/ab17ea.
21. Beckjord, E. (ed.) (2003). The future of nuclear power. An interdisciplinary MIT study. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 170 p.

**Автор**

**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

**Author**

**Sandimirov Sergey Stepanovich**, PhD in Geography  
Institute of North Industrial Ecology Problems Kola Science  
Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia  
E-mail: s.sandimirov@ksc.ru