

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ЭКОСИСТЕМЫ В ГУБЕ БЕЛОЙ (ОЗЕРО ИМАНДРА, МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)¹

© 2021 г. А. С. Павлова^а, *, С. С. Сандимиров^а, Л. П. Кудрявцева^а

^аИнститут проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,
г. Апатиты, 184209 Россия

*e-mail: as.pavlova@ksc.ru

Поступила в редакцию 08.07.2019 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 09.06.2020 г.

Рассмотрено влияние крупного горнорудного комплекса АО “Апатит” на водную экосистему оз. Имандра. Приведены гидрохимические данные, характеризующие зону загрязнения, показано распределение и накопление химических элементов между абиотическими и биотическими компонентами экосистемы: вода, донные отложения, сестон, рыба. Приведены доказательства, что субарктическое озеро в результате загрязнения по содержанию биогенных элементов стало соответствовать эвтрофному статусу, возросли концентрации Al, Sr и Mn в 2–3 раза, Cu и Ni – в 4–6 раз по сравнению с их условно “фоновыми” значениями. Дана оценка биогенного и минерального вклада в формирование донных отложений, а также биодоступности и аккумуляции металлов водными организмами.

Ключевые слова: озеро Имандра, донные отложения, сестон, коэффициент загрязнения, коэффициент накопления.

DOI: 10.31857/S0321059621010235

ВВЕДЕНИЕ

Добыча апатит-нефелиновых руд Хибинского щелочного массива приводит к интенсивным процессам выщелачивания химических элементов, содержащихся в этих породах, и к увеличению их поступления в водную среду. Оценить качество среды водных экосистем, а также степень антропогенного влияния можно как по абиотическим параметрам, так и по биотическим с применением биоиндикации. При этом многие химические элементы, входящие в состав загрязняющих веществ, естественным образом включаются в биогеохимические циклы. В поверхностных водах планктонные организмы и рыбы взаимодействуют с растворенными и взвешенными формами микроэлементов через различные процессы: активное биологическое поглощение, адсорбцию-десорбцию, питание зоопланктона, агрегацию частиц, микробиологическое разложение и т.д. Корректная оценка накопления того или иного элемента в организме животных должна быть основана на сравнении его содержания в

тканях и на усредненном пищевом субстрате (включая воду).

Цель настоящего исследования – современная характеристика химического состава поверхностных вод, донных отложений (ДО) и изучение особенностей распределения химических элементов, поступающих со стоками горнопромышленного производства, между абиотическими и биотическими компонентами экосистемы губы Белой оз. Имандра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Имандра – самый крупный водоем в Мурманской области: длина озера – 109 км, средняя ширина – 3.2 км, площадь с островами – 880.5 км², средняя глубина – 13 м, объем воды – 10.9 км³. Площадь территории водосбора (1379 водотока) составляет 12300 км² [12]. Губа Белая расположена в юго-восточной части плеса Большая Имандра, и в настоящее время на ее берегах сформировался ландшафт, представленный серией отстойников – “хвостов” обогащения апатитового сырья (рис. 1). После отсечения части ее акватории дамбой с целью складирования там отходов апатит-нефелиновых обогатительных фабрик (АНОФ) АО “Апатит”

¹ Работа выполнена в рамках темы НИР (№ 0226-2019-0045) и хоздоговора “Оценка современного состояния и самоочищающей способности поверхностных вод в зоне деятельности промышленных объектов АО “Апатит”.

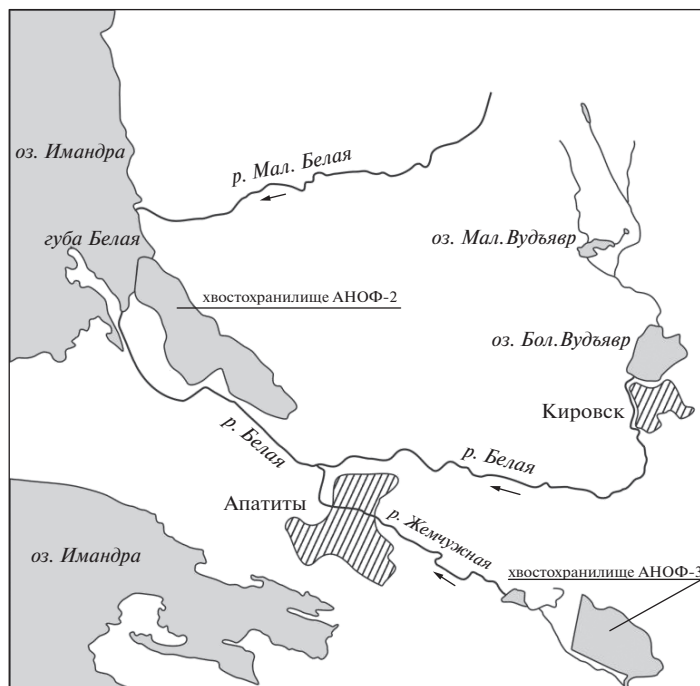


Рис. 1. Картограмма района исследований.

губа представляет собой довольно узкий залив, в который впадает р. Белая. АО «Апатит» с 1930 г. (на протяжении 90 лет) сбрасывает по р. Белой сточные воды (производственные, шахтные, ливневые), содержащие тысячи тонн взвешенных веществ, сульфатов, хлоридов, десятки тонн фосфора, нефтепродуктов и других загрязняющих веществ, применяемых в процессе флотации апатит-нефелиновых руд (ОП-4, талловые масла и др.). Сюда также сбрасываются коммунально-бытовые сточные воды городов Кировска и Апатиты [11].

Отбор проб воды и образцов сестона в губе Белой проводился в летне-осенний период 2011 г. Всего отобрано 20 проб воды и 3 пробы сестона для химического анализа. Пробы воды отбирали с разных горизонтов батометром Рутнера. ДО отобраны в августе 2012 г. пробоотборником открытого гравитационного типа «Skogheim» [18]. ДО делили на слои высотой 1 см. Отбор проб для определения видового состава фитопланктона проводился по общепринятым методикам гидробиологического мониторинга [15]. Сестон отбирался с помощью планктонной сети Апштейна методом траления за лодкой по водоему в толще воды на глубине ~3 м в течение 1–3 ч, чтобы собрать необходимую для химического анализа массу образца 30–50 г в сыром весе. По конструкции планктонная сеть близка к классической зоопланктонной сети Апштейна с планктонным стаканом, диаметром 400 мм, длиной 1000 мм и с размерами пор 29 мкм.

Отлов сига обыкновенного (*Coregonus lavaretus L.*) проводился в 2012 г. с использованием стандартного набора ставных сетей длиной 25 м и высотой 1.5 м с размерами ячеей 10, 16, 20, 31, 36, 40, 45 мм из нейлонового монофиламент с диаметром нити 0.15 мм для сетей с малой ячейей и 0.17 мм для сетей с большой ячейей.

Аналитические методы исследования вод, включая химический анализ компонентов и их первичную подготовку, проводились по стандартным сертифицированным методикам измерений. Анализ воды включал в себя определение рН, щелочности, ионного состава (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) и биогенных компонентов (NH_4^+ , Si , NO_3^- , PO_4^{3-}). Катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} определялись на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Perkin-Elmer 360» в режиме пламенной атомизации. Анионы Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- определялись методом жидкостной хроматографии «WatersHPLS» с кондуктометрическим детектором «Waters 432». Si , PO_4^{3-} , $\text{P}_{\text{общ}}$, NO_3^- , $\text{N}_{\text{общ}}$ и NH_4^+ определялись фотометрическим методом.

Концентрации металлов (Al, Fe, Mn, Sr, Cu, Ni, Zn, Co, Cr, Cd) в воде, ДО, сестоне и рыбе 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. Со-

держание ртути определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии холодного пара на приборе “FIMS-100 Perkin-Elmer”.

По методике И.В. Родюшкина [14] определялись формы металлов Al, Fe, Mn, Sr и Cu: взвешенные и растворимые (лабильные формы – истинные ионы, гидратированные ионы и ионы в составе неустойчивых комплексов, нелабильные – устойчивые комплексные соединения металлов).

Пробы ДО также высушивались при 105°C, далее для определения общих концентраций металлов навеску образца (0.4 г) разлагали в 4 мл HNO_{3конц} в автоклаве с тефлоновым вкладышем при 140°C в течение 4 ч. В пробах сестона и ДО также определяли зольность [4].

Первичная подготовка проб сестона и рыбы проводилась методом разложения высушенных при 105°C образцов в смеси кислот HNO_{3конц} и HCl_{конц} в микроволновой системе “Speedwave™ MWS-3”.

Для контроля качества измерений элементов в воде использовались государственные стандартные образцы (ГСО). Для внутреннего контроля качества процедуры пробоподготовки и качества измерений донных отложений и планктонных образцов общей массой 30–50 г в сыром виде проводилась минерализация сертифицированного образца морского седимента PACS-2 (Canada 08/1997), для контроля ихтиологических проб использовались сертифицированные образцы мышцы акулы DORM-2 (Canada 09/1999) и DORM-3 (Canada 02/2007) [13].

Для оценки степени загрязнения пресноводного озера химическими веществами использованы коэффициенты загрязнения (C_p) Hakanson для донных отложений [17]. В качестве модели минеральной взвеси взяты кларки элементов в земной коре по А.П. Виноградову [3].

Для каждого элемента вклад биогенной доли (Me_{био}) определялся в общем виде, согласно выражению [6]:

$$Me_{био} = \frac{100 \times (C_{исестон} (100 - Z_{до}))}{C_{ДО} (100 - Z_{сестон})}$$

где Me_{био} – долевое участие *i*-го химического элемента в образце, %; C_{исестон}, C_{ДО} – содержание *i*-го химического элемента в сестоне и донном осадке; Z_{ДО}, Z_{сестон} – зольность ДО и сестона соответственно, %.

Степень накопления химических элементов различными компонентами экосистемы оценивалась с помощью безразмерного коэффициента накопления (K_n) как отношение концентрации элемента в данном компоненте к его концентрации в воде [2, 6]:

$$K_n = \frac{C_{iкомпонент}}{C_{iвода}}$$

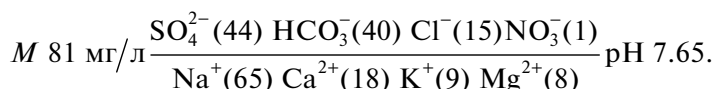
C_{iкомпонент} – содержание *i*-го химического элемента в компоненте среды, мг/кг_{сух в}; C_{iвода} – содержание *i*-го химического элемента в воде, мг/л. Порядок величин K_n рассматривается в шкале логарифмов lg K_n.

Исследуемые формы элементов и их соединений определялись расчетным путем с использованием программного комплекса “CHEAQS” [19] по набору гидрохимических параметров пробы воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимическая характеристика губы Белой оз. Имандра

Вода оз. Имандра в природном ее состоянии относилась к нейтральной с рН от 6.4 до 7.2 [9]. В конце 1990-х–начале 2000-х гг. рН вод в губе Белой менялся от 7.33 до 7.82 в зависимости от гидрологического сезона [10, 11]. В настоящее время рН воды в губе Белой увеличился в сторону подщелачивания – 7.27–8.74. Минерализация составляет в среднем 81 мг/л, что в 3 раза превышает естественное природное значение (20–30 мг/л). Для природных вод Кольского Севера типично преобладание HCO₃⁻ в анионном составе и Ca²⁺ – в катионном. Поступление промышленных сточных вод в водоем обуславливает не только повышение общего содержания солей, но и изменение соотношения главных ионов в воде губы Белой. В минерализации воды отмечается повышение доли сульфатов, среди катионов – натрия:



В доиндустриальный период оз. Имандра характеризовалось как олиготрофный водоем с достаточно низким содержанием соединений азота (NO₃ до 35 мкг/л) и фосфора (PO₄ до 8 мкг/л). Обогащение воды биогенными элементами –

основной критерий процесса эвтрофирования. Развитие промышленности на территории побережья озера способствует интенсивному поступлению в него промышленных, а также хозяйственно-бытовых сточных вод. Концентрация

общего фосфора и азота в осенний период в губе Белой варьировали от 19 до 97 мкгР/л и от 200 до 661 мкгN/л, а среднее содержание фосфатов и нитратов составляло 15 и 347 мкгN/л соответственно. По классификации С.П. Китаева [5], вода в губе Белой в настоящее время соответствует эвтрофному статусу. Концентрация кремния в среднем составляет 0.28 мг/л.

Для оценки степени загрязнения озера металлами в качестве условно-фоновых приняты усредненные концентрации в удаленных от промышленных узлов водоемах Кольского п-ова: $Al < 30$, $Sr < 26$, $Ni < 1$, $Cu < 1$ мкг/л [11]. В период интенсивного антропогенного воздействия поступление в водоем стоков от АО «Апатит» привело к увеличению в нем содержания тяжелых металлов. В период исследования концентрации Al и Sr превысили «фоновые» значения в среднем в 3 раза. Эти элементы – основные компоненты сточных вод АО «Апатит» – поступают в губу Белую в составе тонкодисперсных взвесей нефелина после фильтрации технологических стоков через дамбу хвостохранилища, а также в результате пыления хвостохранилищ. Наблюдается увеличение содержания Cu и Ni в 4–6 раз (табл. 1). Повышение концентраций Cu и Ni связано с их поступлением в водоем в составе сточных вод медно-никелевого комбината, расположенного в северной части оз. Имандра на расстоянии от него ~30 км, а также воздушным путем. Содержание Fe и Mn составляет в среднем 37 и 12 мкг/л соответственно. По данным [11] приняты условно-фоновые концентрации Fe (34 мкг/л) и Mn (5.6 мкг/л). Таким образом, наблюдается превышение содержания Mn в 2 раза. Концентрация Zn в губе Белой составляет ~1.5 мкг/л, что соответствует ее условно-фоновым значениям (2 мкг/л). Содержание Co , Pb и Cr – в пределах обнаружения концентрации – 0.2 мкг/л, а Cd – 0.05 мкг/л.

Al и Fe находились преимущественно во взвешенных формах – от 80 до 90% от общего содержания (табл. 2), которые представлены в виде гидроксидных и оксидных соединений этих металлов, в том числе с сорбированными пленками органических веществ гумусовой природы. Лабильные формы Al и Fe представлены соединениями с ионами хлоридов и гидроксогруппами. Основная форма Sr – лабильная, в наиболее токсичной ионной форме Sr содержится более чем на 97%. Mn находился преимущественно во взвешенной форме, образованной окислами с соединениями Fe , органическим веществом и сорбированными ионами других металлов.

Распределение Cu по формам в результате последовательного разделения согласуется с данными проведенных расчетов и указывает на более высокое содержание растворенных форм – в том числе комплексов с гумусовыми лигандами и не-

органическими анионами (хлориды, гидроксо-группы).

Ионы Zn в большей степени находятся в лабильной форме в виде гидроксо-соединений. Лабильная ионная форма Ni^{2+} составляет >90%. Pb представлен как в лабильной, так и в нелабильной форме, >50% его соединений – лабильные гидроксо-соединения.

Химический состав ДО

Попадая в водную экосистему, химические вещества распределяются между компонентами этой водной среды – часть растворяется в воде, образуя ионы металлов, гидратированные ионы и ионы в составе неустойчивых комплексов, часть находится в виде взвесей. Также элементы сорбируются и аккумулируются гидробионтами, а большая их доля удерживается ДО [7–9, 14]. В ДО губы Белой отмечается максимальное содержание большинства металлов среди других компонентов экосистемы (табл. 3).

В верхних слоях ДО губы Белой содержание Al , Fe , Mn , Zn и Co в среднем в 1.5 раза выше, чем в нижних «условно-фоновых» слоях. Аккумуляция металлов Sr , Cu , Pb в слое 0–3 см увеличивается в 2.5–3 раз, а Cd и Hg – до 4 раз по отношению к нижним слоям ДО. Отмечается высокое содержание Ni в верхних слоях – до 10 раз относительно «условно-фоновых» концентраций. Это увеличение, как отмечалось выше, связано с их накоплением в результате поступления в составе сточных вод медно-никелевого комбината, а также с аэротехногенным переносом. По рассматриваемым элементам степень загрязнения ДО в губе Белой меняется от умеренной (по Al , Fe , Mn , Zn и Co) до значительной (по Sr , Cu , Cd и Pb). Высокая степень загрязнения отмечена по Ni и Hg ($C_f > 6$).

При оценке вклада биогенной и минеральной форм металлов, поступающих через сестон в ДО озера, установлено, что от 39 до 45% Hg и Cd поставляется через органическое вещество сестона. На долю биогенной составляющей Zn и Pb приходится от 10 до 20%. Для большинства рассматриваемых металлов $Me_{\text{био}}$ не превышает 10%. ДО в губе Белой формируются главным образом за счет минеральных компонентов, однако не исключается и некоторый вклад конституционных (биогенных) элементов скелетных и покровных тканей планктонных организмов. Как отмечено в [6], существует методическая проблема геохимической интерпретации вещественного состава проб планктона с целью отнесения их либо к чисто планктонным образцам, либо к пробам сестона (смесь планктона, органического детрита и минеральной взвеси), для ее решения необходимы более углубленные исследования.

Таблица 1. Гидрохимические показатели губы Белой (здесь и в табл. 3 в числителе – среднее, в знаменателе – минимальное–максимальное значения)

| Показатель, размерность | Значение | Показатель, размерность | Значение |
|---|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| pH | $\frac{7.65}{7.27-8.74}$ | Na, мгл ⁻¹ | $\frac{17.0}{16.0-18.0}$ |
| Электропроводность, (20°C), мксмсм ⁻¹ | $\frac{104}{103-135}$ | K, мгл ⁻¹ | $\frac{3.60}{3.16-4.40}$ |
| Щелочность, мкэквл ⁻¹ | $\frac{454}{391-570}$ | Mg, мгл ⁻¹ | $\frac{1.01}{0.89-1.09}$ |
| Органическое вещество, мгСл ⁻¹ | $\frac{3.4}{2.9-3.8}$ | Al, мкг/л | $\frac{91}{46-175}$ |
| P _{общ} , мкгл ⁻¹ | $\frac{55}{19-97}$ | Fe, мкг/л | $\frac{37}{13-62}$ |
| PO ₄ ³⁻ , мкгРл ⁻¹ | $\frac{15}{2-51}$ | Mn, мкг/л | $\frac{12}{4.9-31}$ |
| N _{общ} , мкгл ⁻¹ | $\frac{406}{200-661}$ | Sr, мкг/л | $\frac{67}{55-87}$ |
| NO ₃ ⁻ , мкгНл ⁻¹ | $\frac{347}{176-478}$ | Cu, мкг/л | $\frac{4.1}{3.7-4.6}$ |
| NH ₄ ⁺ , мкгНл ⁻¹ | $\frac{34}{3-85}$ | Ni, мкг/л | $\frac{6.2}{4.9-8.6}$ |
| HCO ₃ ⁻ , мгл ⁻¹ | $\frac{26}{24-30}$ | Zn, мкг/л | $\frac{1.5}{0.4-4.5}$ |
| SO ₄ ²⁻ , мгл ⁻¹ | $\frac{22}{20-23}$ | Cd, мкг/л | $\frac{0.05}{0.01-0.18}$ |
| Cl ⁻ , мгл ⁻¹ | $\frac{5.6}{5.4-5.7}$ | Co, мкг/л | <0.2 |
| Si, мгл ⁻¹ | $\frac{0.28}{0.05-0.66}$ | Pb, мкг/л | $\frac{0.2}{0.1-0.3}$ |
| Ca, мгл ⁻¹ | $\frac{4.21}{3.95-4.60}$ | Cr, мкг/л | $\frac{0.2}{0.1-0.6}$ |

Таксономический и химический состав сестона

В составе фитопланктонного сообщества – главной части сестона – обнаружено 104 таксона водорослей: *Bacillariophyta* – 53, *Chlorophyta* – 24, *Cyanophyta* – 15, *Chrysophyta* – 4, *Dinophyta* – 3, *Charophyta* – 5. В течение всего вегетационного периода в общей биомассе фитопланктона доминировали диатомовые водоросли. Массовые представители (до 80% численности) фитопланктона – 4 вида диатомовых водорослей: *Aulacoseiraislandicavar. helvetica* O. Müll., *DiatomatenuAg. var. tenue*, *AsterionellaformosaHass. var. formosa*, *FragilariacrottonensisKitt. var. Crottonensis* [1].

Химический анализ вод и сестона губы Белой показал, что содержание металлов варьирует в широких пределах (рис. 2) и распределяется для

сестона в ряду: Al > Fe > Mn > Sr > Ni > Zn > Cu > Cr ≥ Pb > Co > Cd > Hg. Наиболее большое накопление отмечено для элементов Al (в среднем 6838 мкг/г_{сух в}) и Fe (в среднем 4302 мкг/г_{сух в}). Содержание Mn составляет в среднем 234 мкг/г_{сух в}.

Содержание металлов в органах и тканях сига (Coregonuslavaretus L)

Металлы неравномерно накапливаются в органах и тканях рыб. Наиболее высокие содержания Al отмечены в жабрах (до 46.9 мкг/г_{сух в}), что, вероятно, связано с адсорбированием взвешенных частиц металла на жаберном аппарате. Су главным образом депонируются в печени рыб. Приоритетным органом – накопителем металлов

Таблица 2. Формы нахождения металлов в водной толще губы Белой и долевое распределение взвешенной и растворимой форм металлов (%)

| Элемент | Горизонт | рН | Взвешенная форма | | | Растворимая форма | | | Растворимая, расчетные данные | | |
|---------|-------------|------|------------------|---------|-----------|--------------------|------------------|---------|-------------------------------|--------------|----------|
| | | | мкг/л | доля, % | расчет, % | нелабильная, мкг/л | лабильная, мкг/л | доля, % | нелабильная, % | лабильная, % | всего, % |
| Al | Поверхность | 7.54 | 92.2 | 81 | 75 | 1.6 | 20.2 | 19 | 2.9 | 22.1 | 25 |
| | 10 м | 7.36 | 154 | 88 | 87 | 2.9 | 18.3 | 12 | 1 | 12 | 13 |
| Fe | Поверхность | 7.54 | 24 | 86 | 85 | 2.6 | 1.4 | 14 | 8.5 | 6.5 | 15 |
| | 10 м | 7.36 | 56.2 | 91 | 89 | 4.3 | 1.5 | 9 | 6.5 | 4.5 | 11 |
| Sr | Поверхность | 7.54 | 11.6 | 14 | 10 | 0.1 | 70.3 | 86 | 5 | 85 | 90 |
| | 10 м | 7.36 | 11.6 | 13 | 10 | 0.3 | 75.1 | 87 | 5 | 85 | 90 |
| Mn | Поверхность | 7.54 | 9.8 | 98 | 99 | 0.1 | 0.1 | 2 | 0.3 | 0.7 | 1 |
| | 10 м | 7.36 | 30.2 | 97 | 99 | 0.3 | 0.5 | 3 | 0.3 | 0.7 | 1 |
| Cu | Поверхность | 7.54 | 1.6 | 30 | 29 | 1 | 1.1 | 70 | 16 | 55 | 71 |
| | 10 м | 7.36 | 1.6 | 38 | 42 | 1.2 | 1.4 | 62 | 13 | 45 | 58 |

Fe, Ni, Cd, Co, Pb и Hg в организме сига являются почками. В скелетной ткани максимально аккумулируются Sr (в среднем 859 мкг/г_{сух в}) и Mn (до 41.5 мкг/г_{сух в}). Аккумуляция Sr и Mn в скелете обусловлена биологическими свойствами элементов, оказывает влияние на процессы костеобразования [16]. Sr накапливается в скелетных тканях: составляя в жабрах 0.55, в скелете – 0.44 мкг/г_{сух в}.

Элементы Sr, Zn и Hg в большей степени накапливаются в организме сига, что, вероятно, обусловлено биологическими свойствами самих элементов. Так, соединения Sr близки по свойствам к соединениям Ca и оказывают влияние на процессы костеобразования, полностью заменяя последний, а также на активность ряда фермен-

тов – каталазы, карбоангидразы и щелочной фосфатазы. Zn активно включается в биологические циклы, являясь металлоферментом, достаточно равномерно распределяется между органами и тканями рыб. Ртуть преимущественно концентрируется в жировой и мышечной тканях до 70% [16].

Расчеты коэффициентов накопления $K_{нд}$ и $K_{нт}$ показали, что биодоступность металлов для водных организмов, в частности для рыб, определяется преимущественно их растворимыми формами миграции в водной массе (табл. 4). Так, например, Sr, для которого основной формой является наиболее токсичная – лабильная, полностью накапливается из воды системами организма рыб, главным образом костными тканями.

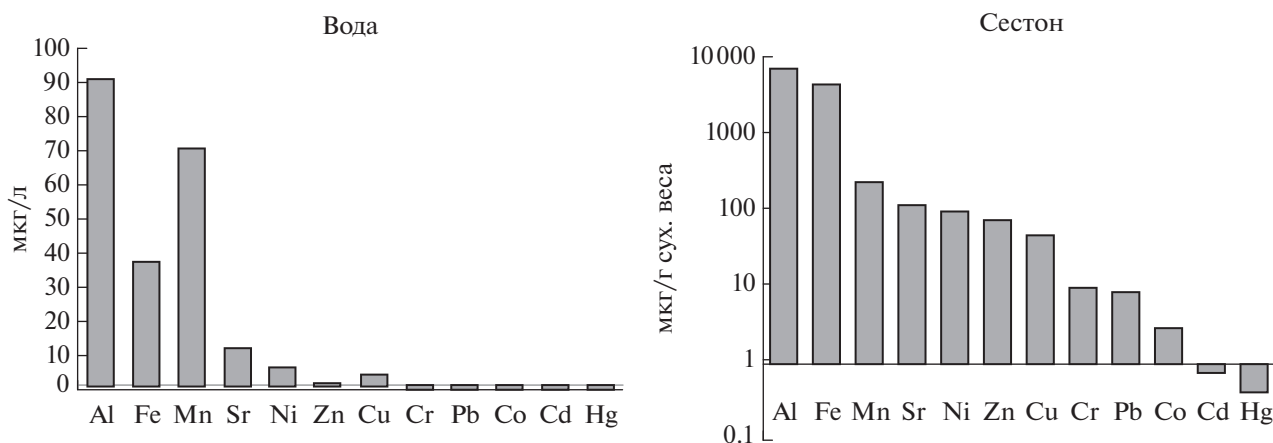
**Рис. 2.** Среднее содержание металлов в компонентах экосистемы губы Белой.

Таблица 3. Содержание металлов в ДО губы Белой (C_f – коэффициенты загрязнения; $Me_{\text{био}}$ – вклад биогенной доли металлов через сестон в ДО, %; кларки элементов в земной коре по [3])

| Элемент | ДО, мкг/г _{сух в} , $n = 10$ | | C_f | $Me_{\text{био}}$, % | Кларки |
|--------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------|--------|
| | 0–3 см | нижний слой | | | |
| Зольность, % | 87.5 | 91 | | | ≈100 |
| Al | $\frac{54803}{36393-80145}$ | $\frac{39163}{23000-52551}$ | 1.4 | 3 | 80500 |
| Fe | $\frac{24377}{22247-26364}$ | $\frac{20615}{13770-22210}$ | 1.2 | 5 | 46500 |
| Mn | $\frac{2975}{1045-6566}$ | $\frac{2016}{909-2846}$ | 2 | 2 | 1000 |
| Sr | $\frac{2303}{1083-5242}$ | $\frac{792}{281-1600}$ | 3.2 | 2 | 340 |
| Cu | $\frac{272}{190-389}$ | $\frac{112}{87-126}$ | 3.1 | 4 | 47 |
| Ni | $\frac{855}{498-1574}$ | $\frac{82.6}{25.7-165}$ | 12 | 3 | 58 |
| Zn | $\frac{125}{88-146}$ | $\frac{91}{69.2-113}$ | 1.4 | 13 | 83 |
| Cd | $\frac{0.44}{0.21-0.73}$ | $\frac{0.1}{0.04-0.17}$ | 5.2 | 45 | 0.13 |
| Co | $\frac{28.7}{25.8-38.7}$ | $\frac{18}{13.2-21.8}$ | 1.6 | 3 | 18 |
| Pb | $\frac{12.8}{10.1-14.5}$ | $\frac{5.50}{1.82-9.92}$ | 3.5 | 17 | 16 |
| Cr | $\frac{33.5}{24.4-41.4}$ | $\frac{48}{38.7-58.1}$ | 0.7 | 8 | 83 |
| Hg | $\frac{0.27}{0.16-0.38}$ | $\frac{0.06}{0.02-0.24}$ | 8.2 | 39 | 0.083 |

Высокие коэффициенты накопления Al, Fe и Mn, а также элементов Ni, Cd, Pb и Cr в сестоне губы Белой, вероятно, связаны не только с бионакоплением металлов в живых планктонных организмах, но также с процессами сорбции ионов металлов (в частности, адсорбции тонкодисперсных взвесей, представленных как минеральной, так и органической составляющей, на поверхности клеточных мембран организмов) и их способностью вступать в комплексообразование с органическими (например, продуктами метаболизма фитопланктона) и органоминеральными веществами [7, 16].

Проведенные исследования показали, что химические элементы, поступающие в губу Белую оз. Имандра, интенсивно накапливаются в различных компонентах его экосистемы. Причем, уровни накопления неодинаковы и определяются

специфическими свойствами как самих элементов, так и особенностями систем организмов, в которых происходит их аккумуляция [2, 6].

Для анализа малых выборок и оценки степени зависимости между переменными были применены методы непараметрической статистики. Анализ содержания загрязняющих веществ в воде, ДО и рыбе, а также коэффициента загрязнения показал высокие корреляционные зависимости: коэффициент корреляции Пирсона: $R^2 = 0.645 - 0.973$ ($p < 0.002$). Пространственное распределение также показало высокую степень зависимости исследуемых параметров при сравнении с гидрохимическими показателями.

Таким образом, антропогенное загрязнение в губе Белой, накладываясь на природные процессы, оказывает существенное влияние на них, сти-

Таблица 4. Коэффициенты накопления в компонентах среды ($K_{нт}$ – относительно общего содержания металла, $K_{нд}$ – относительно растворимой формы металла)

| Компонент | Коэффициент | Fe | Al | Sr | Mn | Cu | Ni | Cd | Co | Zn | Pb | Cr | Hg |
|-----------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Сестон | $K_{нт}$ | 5.2 | 4.9 | 3.2 | 4.3 | 4 | 5.2 | 4.5 | 4.2 | 5.2 | 4.7 | 4.5 | 3.8* |
| | $K_{нд}$ | 2.6 | 1.4 | 2.2 | 2.2 | 2.3 | 2 | 1.9 | 2.3 | 4.4 | 1.8 | 2.9 | 3.5* |
| Мышцы | $K_{нт}$ | 3.5 | 2.1 | 2.3 | 3.5 | 2.5 | – | – | – | – | – | – | – |
| | $K_{нд}$ | 3.7 | 1.8 | 1.9 | 2.9 | 3.7 | 2.4 | 3.1 | 2.7 | 5.2 | 2.4 | 2.8 | 3.6* |
| Печень | $K_{нт}$ | 4.6 | 2.6 | 2 | 4.3 | 4 | – | – | – | – | – | – | – |
| | $K_{нд}$ | 4 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 3.3 | 2.8 | 4.1 | 3.7 | 5.2 | 2.8 | 3.2 | 3.7* |
| Почки | $K_{нт}$ | 4.8 | 2.7 | 2.2 | 4 | 3.5 | – | – | – | – | – | – | – |
| | $K_{нд}$ | 3.7 | 2.6 | 3.5 | 3.4 | 2.8 | 2.6 | 3 | 2.9 | 5.4 | 2.9 | 3.5 | 3.4* |
| Жабры | $K_{нт}$ | 4.6 | 3.5 | 3.5 | 4.8 | 2.9 | – | – | – | – | – | – | – |
| | $K_{нд}$ | 2.8 | 1.8 | 4.1 | 3.6 | 2.3 | 2.7 | 2.2 | 2 | 5.2 | 2.4 | 3.4 | 3.2* |
| Скелет | $K_{нт}$ | 3.7 | 2.4 | 4.1 | 4.9 | 2.7 | – | – | – | – | – | – | – |
| | $K_{нд}$ | | | | | | | | | | | | |

* Коэффициенты накопления рассчитаны относительно предела обнаружения Hg методом холодного пара (≤ 0.05 мкг/л Hg) (ГОСТ Р 51212-98).

мулируя процессы эвтрофирования, а также обогащения вод токсичными микроэлементами, когда водоем подвергается воздействию прямых промышленных стоков.

ВЫВОДЫ

В результате долговременного воздействия горнопромышленного комплекса АО “Апатит” на воду в губе Белой она претерпела техногенную трансформацию. Величина рН воды увеличилась в сторону подщелачивания, изменилось соотношение главных ионов минерализации: в анионном составе преобладающими стали сульфаты, в катионном – натрий. В настоящее время вода по содержанию биогенных элементов имеет эвтрофный статус. Концентрации Al, Sr и Mn увеличились в 2–3 раза, Cu и Ni – в 4–6 раз по сравнению с их условно “фоновыми” значениями в удаленных от промышленных узлов водоемах Кольского п-ова.

Al, Fe, а также Mn преимущественно находятся во взвешенном состоянии. Cu преобладает в растворимой форме: в комплексах с гумусовыми лигандами и неорганическими анионами – хлориды, гидроксогруппы. Основной формой Sr является лабильная, представленная Sr^{2+} более чем на 97%. В лабильной форме преобладает Zn и Ni.

Степень загрязнения ДО оз. Имандра в районе губы Белой меняется от умеренной (Al, Fe, Mn, Zn и Co) до значительной (Sr, Cu, Cd и Pb). Высокая степень загрязнения отмечена для Ni и Hg ($C_f > 6$). Поступление рассматриваемых металлов в ДО связано, главным образом, с химическими элементами минерального происхождения и менее значимо – с органическим веществом сестона.

Биодоступность металлов водными организмами определяется преимущественно их формой нахождения в водной среде, а также их физико-химическими особенностями.

В организмах рыб выявлены следующие закономерности: приоритетным органом – накопителем тяжелых металлов являются почки; для печени характерна высокая степень обогащения Zn, Hg и Cu; Cd концентрируется в печени и почках; костные ткани обогащены Sr.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вандыш О.И., Денисов Д.Б., Черепанов А.А., Горбачева Т.А., Кашулин Н.А.* Особенности планктонных сообществ губы Белой озера Имандра при долговременном воздействии сточных вод горнорудного производства // Тр. КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. Вып. 3. С. 35–67.
2. *Ветров В.А., Кузнецова А.И.* Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал / Под ред. *М.И. Кузьмина*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 234 с.
3. *Виноградов А.П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
4. *Даувальтер В.А.* Исследование физического и химического состава донных отложений при оценке экологического состояния водоемов: учеб. пособие по дисциплине “Геохимия окружающей среды”. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2006. 84 с.
5. *Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / Под ред. *Л.В. Карabanовой*. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

6. *Леонова Г.А.* Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов. Новосибирск: Гео, 2012. 314 с.
7. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 270 с.
8. *Малиновский Д.Н.* Особенности миграции загрязняющих веществ в районах разработки апатитонелефиновых месторождений Мурманской области. Дис. ... канд. геогр. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 236 с.
9. Материалы к изучению вод Кольского полуострова. Мурманск: Кольская база АН СССР, 1940. С. 45–98.
10. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* Формирование химического состава вод Мурманской области в условиях функционирования горнорудных и металлургических производств // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4 (20). С. 4–13.
11. *Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильяшук Б.П., Ильяшук Е.А., Сандириров С.С., Каган Л.Я., Вандыш О.И., Шаров А.Н., Шарова Ю.Н., Королева И.М.* Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра // Отв. ред. *Т.И. Моисеенко*. М.: Наука, 2002. 403 с.: ил.
12. *Моисеенко Т.И., Яковлев В.А.* Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. 220 с.
13. *Павлова А.С., Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Терентьев П.М., Кашулина Т.Г., Даувальтер В.А.* Распределение химических элементов между компонентами экосистемы арктического озера Большой Вудъявр (Хибины, Мурманская область) // Сибирский экол. журн. 2019. № 3. С. 348–366.
14. *Родюшкин И.В.* Формы нахождения металлов в воде озера Имандра // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского полуострова. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 55–64.
15. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. *В.А. Абакумова*. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 305 с.
16. *Чистяков Ю.В.* Основы бионеорганической химии // М.: Химия, Колос-с, 2007. 539 с.
17. *Hakanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control – sedimentological approach // *Water Res.* 1980. V. 17. № 36. P. 663.
18. *Skogheim O.K.* Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: NLH, 1979. № 2. 7 p.
19. *Verweij W.* Chemical Equilibria in Aquatic Systems (CHEAQS) Next program. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cheaqs.eu/index.html> (дата обращения: 20.05.2019)