

ВЛИЯНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА, МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ

В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты, Россия

Эл. почта: vladimir@dauvalter.com

Статья поступила в редакцию 02.07.2015; принята к печати 21.07.2015

Крупнейший водоем Мурманской области – озеро Имандра – более 80 лет испытывает загрязнение промышленными сточными водами горнодобывающих и металлургических предприятий и коммунально-бытовыми стоками населенных пунктов, что сказалось в значительных преобразованиях химического состава воды и донных отложений озера, ухудшении экологического состояния озера и изменении структуры гидробионтов. Для оценки современного экологического состояния оз. Имандра и изучения истории развития и загрязнения озера был исследован химический состав донных отложений, для чего отбирались их колонки, и проводился послойный анализ накопления элементов. Определялись содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Cr), щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), а также Al и P. Установлено, что геохимический состав донных отложений оз. Имандра претерпел значительные изменения по всей акватории вследствие как прямого поступления сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса и коммунально-бытовых стоков, так и аэротехногенного загрязнения водосбора озера и ветровых нагонных течений. Наибольший вклад в эти преобразования оказывают горнометаллургические, горнодобывающие и горноперерабатывающие предприятия – комбинат «Североникель», ОАО «Апатит» и «Олкон». Самые значительные преобразования химического состава произошли на акватории поступления стоков металлургического комбината «Североникель», где в поверхностных слоях донных отложений происходит лавинное увеличение концентраций всех исследуемых тяжелых металлов. Концентрации Ni и Cu увеличились на три и два порядка соответственно по сравнению с глубокими фоновыми слоями – до 3 и 0,6%. Увеличение содержания более чем на порядок зафиксировано и для остальных тяжелых металлов – Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Cr, которые являются сопутствующими металлами в медно-никелевой руде. Влияние стоков предприятий ОАО «Апатит» сказалось в увеличении концентраций элементов, содержащихся в апатитонепелиновых рудах и вскрышных породах (Ca, P, Na, K, Al, Sr). Обнаружилось также аномальное увеличение содержания Hg, связанное с проведением взрывных работ на рудниках.

Ключевые слова: тяжелые металлы, щелочные и щелочноземельные металлы, донные отложения, озеро Имандра, загрязнение.

THE IMPACT OF MINING-AND-SMELTING INDUSTRY ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE LAKE IMANDRA, (MURMANSK OBLAST, RUSSIA)

V.A. Dauvalter, N.A. Kashulin

Institute of Northern Environmental Problems, Kola Research Center, Russian Academy of Sciences, Apatity,
Russia

E-mail: Vladimir@dauvalter.com

The largest freshwater basin of Murmansk Oblast, the lake Imandra, has been being polluted with industrial sewage produced by mining and smelting industry and residential wastewaters for more than 80 years. As a result, the chemical composition of its water and bottom sediments, as well as its environmental conditions and aqueous flora and fauna, is changed significantly. We carried out a layer-by-layer analysis of column samples cut out of the bottom sediments of the lake to trace the history of its pollution. To this end, we determined the levels of heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, and Cr), alkaline and earth metals, and Al and P. The geochemical composition of bottom sediments was found to undergo changes all through the area of the lake by the effects of the direct pollution with industrial and residential sewages, of airborne and industrial pollutants entering the basin of the lake, and of pileups and wind-induced flows. The most important industrial contributors to these changes are Severonikel Industrial Complex, OAO Apatit, and OAO Olkon. The most drastic changes were found in the area affected by Severonikel where the levels of all heavy metals are increasing in the upper layers of bottom sediments in a snowball fashion. The levels of Ni and Cu increased by two to three orders, to 3% and 0.6% respectively, compared with the deep layers presenting the background levels of these metals. More than tenfold increases were found in the levels of other heavy metals, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, and Cr, which are associated components of copper-nickel ores. The impact of OAO Apatit is manifested as increases in the levels of elements comprised in apatite and nephelin ores and overburdens (Ca, P, Na, K, Al, and Sr). Abnormally high levels of Hg are presumably associated with firing works at mines.

Keywords: heavy metals, alkaline and earth metals, bottom sediments, the lake Imandra, pollution.

Введение

Исследование химического состава толщи донных отложений (ДО) позволяет восстановить динамику качества воды и ДО для отдельных озер на основе

определения фоновых значений содержания различных элементов в ДО и изменений их поступления в течение длительного периода времени. Эти исследования весьма актуальны для территорий с высо-

коразвитой горнопромышленной индустрией, где существует аномальное распределение элементов вследствие геохимических особенностей и антропогенного влияния на них [17].

Спокойные ненарушенные места аккумуляции ДО могут содержать исторические записи прошлых условий (климатических, геохимических), существующих на водосборе водоема. Если могут быть найдены и исследованы достаточно большие по площади и стабильные во времени места осадконакопления (в которых не происходит физических и химических изменений), исследователь может установить химические изменения во времени, и становится возможным определить фоновые значения для данной территории, которые могут быть сравнены с существующими условиями.

Как правило, крупные промышленные предприятия горно-металлургического комплекса Мурманской области расположены на водосборах больших озер и водных систем – озерах Имандра, Умбозеро, Ловозеро и озерно-речной системы Пасвик. Эти же водоемы являются в течение 60–80 лет основными приемниками сточных загрязненных вод промышленных гигантов. Поэтому исследование вертикального распределения элементов в ДО оз. Имандра позволит реконструировать антропогенную нагрузку на них во времени.

Физико-географическая характеристика озера Имандра

Озеро Имандра расположено на крайнем северо-западе Европейской территории России, в Мурманской области (рис. 1), в глубокой тектонической депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря [12]. Эта депрессия делит Мурманскую область на две части: западную – материковую, и восточную – полуостровную. Озеро Имандра – самый крупный водоем в Мурманской области и одно из крупнейших в Заполярье: длина озера – 109 км, средняя ширина – 3,19 км, площадь с островами – 880,4 км², объем воды – 10,86 км³. Общая площадь водосбора озера составляет 12300 км².

Форма озера чрезвычайно сложная, отвечает разнообразию рельефа побережья. Озеро состоит из трех, в значительной мере обособленных, плесов (Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра), соединяющихся между собой узкими проливами – салмами (рис. 1). Северную часть – Большую Имандру – огораживает дугой Хибинский щелочной массив. Плес Большая Имандра вытянут в меридиональном направлении. По площади водного зеркала Большая Имандра уступает Йокостровской, но является самой глубоководной частью озера. Наибольшая глубина (67 м) находится между островом Сяв и Песчаным наволоком. Плеса Йокостровская и Бабинская Имандра простираются в широтном направлении. Йокостровская Имандра имеет наибольшую площадь (361,9 км²) и в двух пересечениях наибольшую ширину: напротив губы Охтокандской (18,7 км) и в районе Зашеечной губы (13,7 км). В западной части плес соединяется с Бабинской Имандрой через пролив Широкая Салма, имеющий ширину около 0,5 км и наибольшую глубину в этом плесе (42 м). В Бабинской Имандре расположены самые крупные острова – Ерм и Роват (последний в настоящее время превращен в полуостров из-за пересыпки дамбой пролива Узкая Салма).

Антропогенная нагрузка на озеро Имандра

Озеро Имандра более 80 лет загрязняется промышленными стоками предприятий и коммунально-бытовыми водами населенных пунктов, что сказалось в значительных преобразованиях химического состава воды и ДО озера, ухудшении его экологического состояния [9].

Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение на пути основных транспортных магистралей привели к развитию мощного индустриального комплекса на территории водосбора, что привело к высокой антропогенной нагрузке на озеро. Среди основных производителей выделяются следующие: горнодобывающая промышленность (ОАО «Апатит»), металлургическая промышленность (ОАО «Североникель»), железорудное производство (ОАО «Олкон»), энергетический комплекс (Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ, каскад Нивских ГЭС), а также муниципальные стоки городов.

Горнодобывающая промышленность

Промышленное освоение единственных в мире по своему масштабу апатитонепелиновых месторождений с огромными запасами фосфорной кислоты на берегах оз. Имандра было начато в 1930-е гг. В 1929 г. был введен в строй Апатитовый рудник, а в 1931 г. – первая обогатительная фабрика (АНОФ-I). Именно с этого времени в восточную часть Имандры по реке Белой начали поступать без очистки сточные воды. Апатитовая индустрия планомерно набирала мощность и к 1938 г. производила более 1 млн тонн апатитового концентрата [1]. В годы Второй мировой войны работа рудников и обогатительных фабрик была остановлена, а производственные мощности переориентированы на оборонную промышленность (производство желтого и гранулированного фосфора, фосфорных зажигательных бомб и др.).

К 1970-м гг. на прилегающей акватории оз. Имандра сформировалась техногенная залежь апатитонепелиновых пород высотой до 8 м [16]. Стоки от АНОФ-I (apatитонепелиновой обогатительной фабрики № 1) поступали в хвостохранилище, построенное в верховьях реки Жемчужной. Дальнейшее развитие горно-перерабатывающей промышленности в Хибинах продолжалось в 1956–1965 гг., в период освоения Юкспорского и Расвумчоррского месторождений и ввода в эксплуатацию крупных карьеров. В 1963 г. была пущена в эксплуатацию 2-я обогатительная фабрика (АНОФ-II), мощность которой в 1978 г. достигла 10 млн тонн концентрата в год. Одновременно со строительством АНОФ-II был сооружен отстойник-накопитель в губе Белой озера Имандра площадью 3,4 км². Крупная фракция апатитонепелиновых отходов осаждалась, а осветленная часть стоков с высоким содержанием мелкодисперсных взвесей ($\varnothing < 0,2$ мкм) сбрасывалась в губу Белую. Периодически случались аварийные сбросы. Ежедневно для производственных целей фабрика забирала 400 тыс. м³ чистой воды. Загрязнение озера интенсивно продолжалось и в конце 1970-х гг. достигло максимума: ежегодно сбрасывалось 240 млн м³ отходов. В составе сточных вод в водоем вносились тысячи тонн взвешенных веществ: сульфатов, хлоридов, тонны фосфора, нефтепродуктов и других загрязняющих веществ, также в их составе присут-

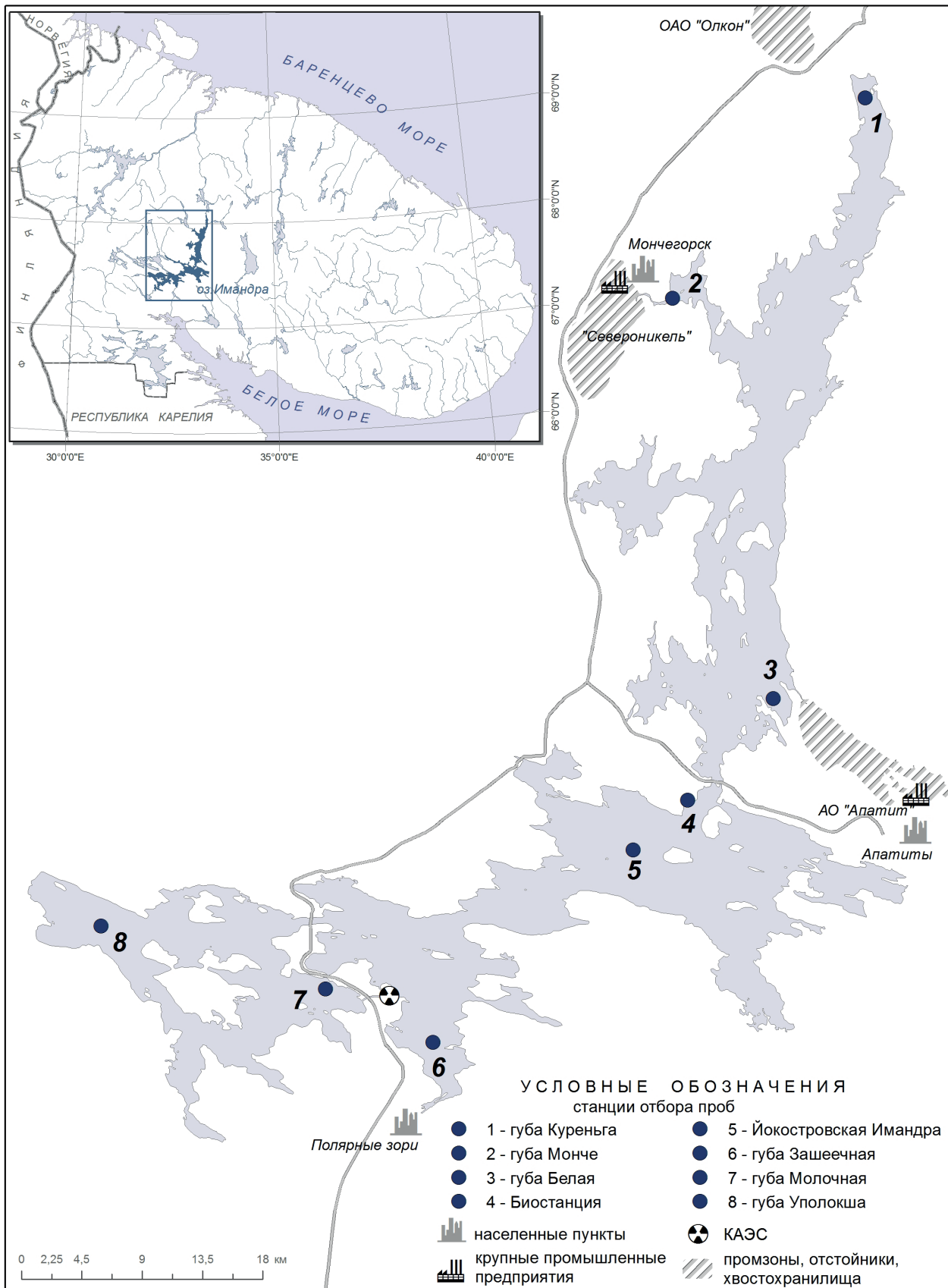


Рис. 1. Схема расположения станций отбора колонок ДО на оз. Имандра

ствали остаточные концентрации токсичных органических веществ, применяемых в процессе флотации апатитонепелиновых руд (ОП-4, таловые масла и др.). Прозрачность вод в губе Белой в этот период

составляла всего 0,5–1,0 м. В сентябре 1978 г. ввод первой очереди комплекса с использованием в технологическом процессе частичного оборотного водоснабжения позволил снизить объем сброса сточных

вод, а к концу 1980 г. обогатители перешли на 80%-й водооборот. В 1990-е гг. наметилась тенденция снижения сброса сточных вод, что связано со снижением производства вследствие общеэкономического кризиса, а с 1997 г. объем сточных вод снова стал резко увеличиваться.

Металлургическая промышленность

В 1938 г. на берегу озера был построен комбинат «Североникель», включающий плавильный комплекс по получению тяжелых металлов (ТМ) – меди, никеля, кобальта, а также золота, серебра, платины и селена. До 1960 г. использовалась местная руда (рудник «Ниттис-Кумужье» на водосборе озера Имандра) с высоким содержанием металлов и низким содержанием серы. Дополнительно (с 1946 г.) также использовалась руда из рудника «Каула» (до 23% серы) в Печенгском районе вблизи российско-норвежской границы. До 1950 г. производство никеля и меди не превышало 10000 и 6300 тонн соответственно. В 1960 г. после расширения и реконструкции комбината его продукция увеличилась в 2,7 раза.

С 1940 г. комбинат сбрасывает сточные воды в северо-западную часть озера Имандра – губу Монче. Объем сточных вод в 1970 г. составлял 25 млн м³/год. С 1973 г. в производстве стала в основном использоваться руда из Норильска (400 тыс. т/год), содержание серы в которой в 3 раза выше, чем в местном сырье (до 30%). Одновременно возросло загрязнение водосборной площади озера за счет атмосферного переноса. На дне залива – губы Монче – уже к 1978 г. образовалась техногенная залежь, где концентрация никеля приближалась к исходной в медно-никелевых рудах – более 1%. Объем сточных вод в период 1976–1999 гг. изменялся в пределах 15,0–27,2 млн м³/год. В их составе присутствуют никель, медь, кобальт и нефтепродукты, взвешенные вещества, токсичные флотореагенты: ксантогенат бутиловый и дитиофосфат крезильовый. Несмотря на ввод ряда очистных сооружений и оборотных систем водоснабжения сточная вода, поступающая в озеро, остается крайне загрязненной тяжелыми металлами [12].

Железорудное производство

С 1955 г. в северной части водосбора озера Имандра действует Оленегорский горно-обогатительный комбинат, который добывает и обогащает железные руды – магнетит-гематитовые кварциты. «Хвосты» обогатительного процесса содержали огромное количество тонких взвесей, представленных минералом гематитом. Оседая, эти взвешенные частицы сильно загрязняли ДО и резко повысили в них содержание железа (до 5–10%), марганца и ванадия [16]. До 1975 г. стоки комбината поступали в озеро Пермус и далее, в северную часть плеса Большая Имандра, в состав которых входили гематитовые шлаки, железо, марганец, ванадий. В 1975 г. на производстве было введено 100%-е оборотное водоснабжение, позволившее сократить объем стоков. Несмотря на замкнутое водоснабжение, загрязняющие вещества в том или ином объеме продолжают поступать в губу Куреньга оз. Имандра. В эту же часть озера попадают сточные воды Оленегорского механического завода, содержащие медь, цинк, взвешенные вещества, фенолы и нефтепродукты.

Муниципальные стоки

Одновременно с промышленными отходами в одни и те же участки озера поступают и хозяйственные стоки, что приводит к параллельному с токсичным загрязнением эвтрофированию вод. На водосборной площади озера в настоящее время проживает около третьей части населения Мурманской области (примерно 250 тыс. человек). Общий объем коммунальных стоков составляет порядка 100 тыс. м³/сут.

В зоне негативного влияния ОАО «Североникель» находится источник питьевого водоснабжения города Мончегорска – озеро Монче. В зоне влияния ОАО «Апатит» и городов Кировск и Апатиты находятся озеро Большой Вудъявр и река Белая. Река Белая вытекает из озера Большой Вудъявр, принимая по пути хозяйственно-бытовые и ливневые воды городов Кировск и Апатиты. Озеро Пермус, связанное небольшой протокой с Большой Имандрой, является питьевым источником города Оленегорска. Кроме загрязненного Комариного ручья, принимающего сточные воды Оленегорского механического завода, в озеро через другие водотоки поступают недостаточно очищенные сточные воды предприятий Минобороны РФ и ряда мелких предприятий. Озеро также испытывает влияние расположенной вдоль озера автомагистрали Мурманск–Санкт-Петербург. Нагрузка от хозяйственных стоков на озеро по фосфору ориентировочно оценивается в 500 т/год. Поэтому, несмотря на хорошее обогащение воды кислородом и высокий водообмен, в придонных слоях происходило накопление органического вещества и создавались бескислородные условия в подледный период. Процесс эвтрофирования в оз. Имандра в последние годы лишь усиливается, что связано не только с интенсивным загрязнением озера биогенными элементами, но и глобальным изменением климата. Это приводит к значительной перестройке структуры гидробионтов озера.

Энергетика

В 1934 г. на единственном стоке из озера Имандра – реке Ниве – была сооружена ГЭС Нива-II, приведшая к зарегулированию стока, что нарушило естественный ход колебаний уровня воды в озере. Наибольший ущерб здесь связан с затоплением больших площадей искусственными водохранилищами, что вызвало существенные потери леса, преграждение путей и ликвидацию традиционных мест нереста ценных пород рыб. В процессе эксплуатации ГЭС отмечались случаи сброса воды из водохранилищ больше обычного, что вызывало неоднократное обсыхание прибрежной полосы и гибель отложенной икры. В энергетический комплекс входит также Апатитская ТЭЦ, сбрасывающая в р. Белую более 10 тыс. м³/сут воды с градиентом.

В 1973 г. на берегу озера Имандра была введена в строй Кольская АЭС. Для охлаждения агрегатов станция забирает воду из Йокостровской Имандры и сбрасывает в подогретом на 10–12 °С состоянии в Бабинскую Имандру. До 1984 г. было возведено 2 блока мощностью по 440 МВт, расход воды при этом составлял 40 м³/с. В настоящее время введены в эксплуатацию 4 блока, расход воды около 80 м³/с. Сброс промышленных вод, используемых для охлаждения реакторов Кольской АЭС, привел к повышению температуры воды, активизации круговорота элементов и биохимических процессов в водоеме. В отводной

канал КАЭС поступают также сточные воды предприятия (объем около 5 тыс. м³/сут), промышленно-ливневой канализации и хозяйственно-бытовые (объем около 400 м³/сут) после прохождения через очистные сооружения. Термальный фактор воздействует локально и характерен только для губы Молочной оз. Имандра. В настоящее время влияние подогретых вод на термический режим оз. Имандра распространяется примерно на 25–30 км² [12].

Аэротехногенное загрязнение

Аэротехногенная нагрузка на Кольском Севере связана, прежде всего, с функционированием медно-никелевых металлургических комплексов и трансграничным переносом воздушных масс из индустриальной Европы в Арктику [8]. Приоритетными загрязнителями воздуха Кольского п-ва среди жидких и газообразных веществ являются сернистый газ (91%) и монооксид углерода (3%), среди твердых – апатитонепелиновая пыль (62%) и неорганическая пыль (37%), в том числе тяжелые металлы [12]. Массовым загрязнителем является сернистый газ. Современный региональный уровень выпадения антропогенной серы в центре Кольского п-ва оценивается в 1–3 г/м² год. Комбинат «Североникель» выбрасывает в атмосферу около 40% общего количества отходящего газа.

Наиболее токсичными выбросами являются ТМ. Выпадение металлов в зимний период на водосборе оз. Имандра (район Лапландского заповедника) составляет: никеля – 15 мкг/м²/сут, а меди – 8 мкг/м²/сут. Вблизи комбината «Североникель» на открытую местность выпадает никеля – 400 мкг/м²/сут, а меди – 430 мкг/м²/сут [8]. Экспериментальные работы, проведенные на территории Кольского п-ва, показали, что в период вегетации металлы задерживаются почвами: никель – на 95%, медь – на 99%.

Материалы и методы

Сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН с момента образования Института за четверть века на оз. Имандра было отобрано более 60 колонок ДО. Из всего этого многообразия было выбрано 8 колонок, отобранных за последние 5 лет, для описания динамики аккумуляции исследуемых элементов в ДО озера. Выбранные станции располагаются вблизи основных источников загрязнения, расположенные на берегах Большой Имандры (губы Монче, Куреньга, Белая), – комбинаты «Североникель», «Олкон» и ОАО «Апатит», в транзитной зоне распространения потоков загрязнения со стоковыми течениями (центр Йокостровской Имандры, биостанция, Зашесная губа), в месте поступления подогретых вод Кольской АЭС (Молочная губа) и в наименее загрязненной акватории (губа Уполокша) (рис. 1).

Для оценки современного экологического состояния оз. Имандра и изучения истории развития и загрязнения территории водосбора озера были исследованы ДО. Образцы ДО брались отборником колонок открытого гравитационного типа, изготовленного из плексигласа (внутренний диаметр 44 мм), с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник сделан по образцу, разработанному Скогхеймом [20], позволяющему транспортировать колонки в лабораторию либо в полевой лагерь ненарушенными для дальнейшего использования. Колонки ДО были

последовательно разделены на слои по 1 см, помещены в предварительно помытую кислотой полиэтиленовую посуду и отправлены в лабораторию для анализа.

Первичная обработка проб ДО (высушивание, определение влажности, прокаливание и определение ППП) и определение содержания ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Mn, Fe, Cr), щелочных и щелочно-земельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), а также Al и P, проводился в лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) Кольского научного центра РАН.

Образцы (примерно 5 г) были высушены в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 6 часов, и определялась влажность образца [19]. Затем образцы прокаливались в муфельной печи при температуре 450–500 °С в течение 4 часов для определения потерь при прокаливании (далее в тексте ППП) как косвенного показателя содержания органического вещества. Образцы затем растирались в яшмовой ступе и сохранялись при температуре 4 °С до химического анализа.

Для определения валовых концентраций металлов высушенная при 105 °С навеска образца массой 0,2 г обрабатывалась 4 мл концентрированной азотной кислотой (HNO₃) класса ОСЧ в автоклаве с тефлоновым вкладышем при температуре 140 °С в течение 4 часов. Содержимое автоклава потом охлаждалось до комнатной температуры, 2 мл аликвота перемещалось в 60 мл пластиковую бутылочку и разбавлялось деионизированной водой до объема 25 мл. Результирующий раствор анализировался методом атомной абсорбции: в пламени ацетилен-воздух (Cr, Co, Fe, Mn), в пламени ацетилен-закись азота (Sr, Al) с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра ААС-30; с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Perkin-Elmer-360 в пламени пропан-бутан-воздух (Ni, Cu, Zn), в пламени пропан-бутан-закись азота (Ca, Mg), атомной эмиссии в пламени пропан-воздух (Na, K). С помощью прибора ААН-800 (электротермическая атомизация) определяли концентрации Cd, Pb, As. Концентрации Hg определяли с использованием проточно-инжекционной ртутной системы Perkin-Elmer FIMS 100. Фосфор определяли фотометрическим методом с помощью прибора КФК-3–01 «ЗОМЗ». Концентрации микроэлементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Sr) выражены в микрограммах на грамм (мкг/г) сухого веса, а макроэлементов (Mn, Fe, Ca, Mg, Na, K, Al, P) – в миллиграммах на грамм (мг/г) сухого веса.

Статистическая обработка результатов исследований и построение графиков проводились с использованием стандартных программ Statistics (version 6.0) и Excel (version 7.0) на персональном компьютере IBM PC AT.

Подробнее методика проведения химического анализа ДО озера описана ранее [7].

Результаты исследований

Самые значительные преобразования химического состава в последние 60–80 лет произошли в толще ДО северного плеса Большая Имандра. В поверхностных слоях ДО губы Монче происходит лавинное увеличение концентраций всех исследуемых ТМ по сравнению с глубокими фоновыми слоями. Концентрации Ni увеличились на три порядка – с 50 до

30000 мг/г (или с 0,005 до 3%), то есть в поверхностном слое ДО губы Монче содержание Ni превышает кондиционную норму для никелевой руды (рис. 2). Концентрации Cu здесь возросли на два порядка (с 50 до 6000 мкг/г, или с 0,005 до 0,6%, что сопоставимо с содержанием в кондиционной руде). Увеличение содержания более чем на порядок зафиксировано и для остальных ТМ – Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Cr, которые являются сопутствующими металлами в медно-никелевой руде. Максимальные концентрации ТМ (кроме As и Hg) отмечаются в самом поверхностном 1 см слое ДО, что говорит о том, что антропогенная нагрузка на эту часть акватории озера все увеличивается. Наибольшее содержание As и Hg отмечено в приповерхностном слое 1–2 см ДО, причем концентрация Hg в самом верхнем слое снизилась в 3 раза. Заметное увеличение содержания большинства ТМ происходит на глубине 7 см ДО, и, вероятно, это связано с резким увеличением количества перерабатываемого сырья и выпуска продукции комбинатом «Североникель» почти в 3 раза в 1960 г. после реконструкции комбината и начала переработки привозной норильской высокосернистой руды. Можно рассчитать среднюю скорость осадконакопления в этой акватории озера, которая равна примерно 1,5 мм/год, учитывая, что слой 7 см ДО накапливался полвека.

Максимальные концентрации Mn и Fe наблюдаются на глубине 6 см ДО, в поверхностном 5 см слое происходит постепенное снижение содержаний этих металлов, и в поверхностном 1 см слое концентрации Fe вернулись на прежний доиндустриальный уровень, а Mn даже стали меньше его в 2 раза (рис. 2). Увеличение содержания Fe и Mn в ДО связано с деятельностью комбината «Североникель», так как для получения Ni и Cu используются сульфидные медно-никелевые руды, в которых главными минералами являются такие, как пентландит $(Fe, Ni)_3S_8$, халькопирит $CuFeS_2$, кобальтин $(Co, Ni)AsS$, никелин $NiAs$, галенит PbS , сфалерит ZnS , хромит $FeCr_2O_4$ и другие (Gregurek et al., 1999), то есть в их составе, помимо других ТМ, присутствует Fe.

Поведение и содержание Fe и Mn зависит также и от геохимических условий в воде и поровых водах ДО, главным образом от кислотно-щелочных (pH) и окислительно-восстановительных (Eh) условий. Для обоих элементов более высокая степень окисления характерна для нерастворимых форм, в то время как меньшая степень окисления – для растворимых и относительно более свободных от комплексобразования. Например, растворимость гидроокиси двухвалентного железа на четыре порядка выше растворимости гидроокиси трехвалентного железа. Растворимость гидроокисей железа зависит также от концентрации ионов водорода, например, растворимость гидроокиси трехвалентного железа при уменьшении pH с 8 до 6 увеличивается также на четыре порядка [2].

На границе между кислородными и бескислородными условиями (то есть окислительной и восстановительной обстановки) образуется окислительно-восстановительный геохимический барьер [14], происходит изменение степени окисления Fe и Mn и осаждение их окислов и гидроокислов в виде железомарганцевых конкреций (ЖМК). Первые находки ЖМК в ДО оз. Имандра были описаны в одной из наиболее ранних работ, посвященных изучению

озера [15]. Находки ЖМК в начале 2000-х гг. были отмечены сотрудниками ИППЭС в средней части губы Монче на глубине 15 м [6]. Найденные конкреции представляют собой железомарганцевую рудную корку коричневого цвета толщиной до 10 мм, которая была локализована в 0–4 мм от поверхности ДО (серый или черный ил).

Процессы эвтрофирования могут усиливать миграцию соединений Mn и Fe в течение года. Зимой во время дефицита O_2 происходит миграция Mn и Fe из ДО в водную толщу, и наоборот, летом, когда наблюдается нормальное насыщение воды O_2 , металлы переходят в окисные формы, выпадают в осадок и осаждаются на дно [10]. В результате редокс-цикла Mn и Fe еще долгое время могут находиться в повышенных концентрациях в верхних слоях ДО [3, 4, 6, 10, 11].

По направлению к поверхности ДО губы Монче происходит также увеличение содержания петрогенных элементов, входящих в состав главных породообразующих алюмосиликатных минералов, – Al и щелочных и щелочноземельных металлов Na, K, Mg (а также Sr) (рис. 2). Исключением является Ca, максимальные значения которого отмечены на глубине 5 см (так же как и Na и Sr), но, в отличие от других щелочных и щелочноземельных металлов, содержание Ca в поверхностном 1 см слое меньше фонового значения.

Распределение P отличается от всех исследуемых элементов – по направлению к поверхности ДО губы Монче происходит постоянное уменьшение содержания, и в поверхностных слоях оно почти на порядок меньше, чем в глубоких фоновых слоях (рис. 2).

В губе Куреньга, так же как и в губе Монче, происходит рост содержания ТМ (за исключением Zn) по направлению к поверхности ДО (рис. 3), что связано с деятельностью как ОАО «Олкон», так и комбината «Североникель», сточные воды которого из губы Монче достигают самой северной оконечности озера (губа Куреньга) с помощью нагонных и компенсационных течений. По мере распространения течений от места поступления основной части ТМ от комбината «Североникель» происходит разбавление их высоких концентраций, поэтому содержание ТМ в поверхностных слоях ДО губы Куреньга более чем на порядок меньше, чем в губе Монче. Для Co, Pb As и Hg отмечается поверхностный максимум, тогда как для Ni, Cu и Cd – приповерхностный максимум содержания (рис. 3). Заметное увеличение содержания ТМ в ДО губы Куреньга отмечается на глубине от 4 до 6 см, следовательно, скорость осадконакопления на этой акватории немного меньше, чем в губе Монче.

Наряду с ростом концентраций ТМ, в ДО губы Куреньга по направлению к их поверхности происходит увеличение содержаний Mn (в 25 раз – с 0,16 до 4,1%) и Fe (в 7 раз – с 3 до 20%), что связано с влиянием сточных вод ОАО «Олкон», разрабатывающего и обогащающего магнетит-гематитовые кварциты (рис. 3). Максимальные концентрации Mn и Fe наблюдаются на глубине 3 и 5 см соответственно, в поверхностных слоях происходит снижение содержания этих металлов вследствие ввода с 1975 г. 100%-го оборотного водоснабжения, позволившего сократить сброс стоков ГОКа. Однако концентрации Mn и Fe не вернулись на прежний доиндустриальный уровень, потому что периодически возникают ситуации, когда загрязняющие вещества продолжают поступать

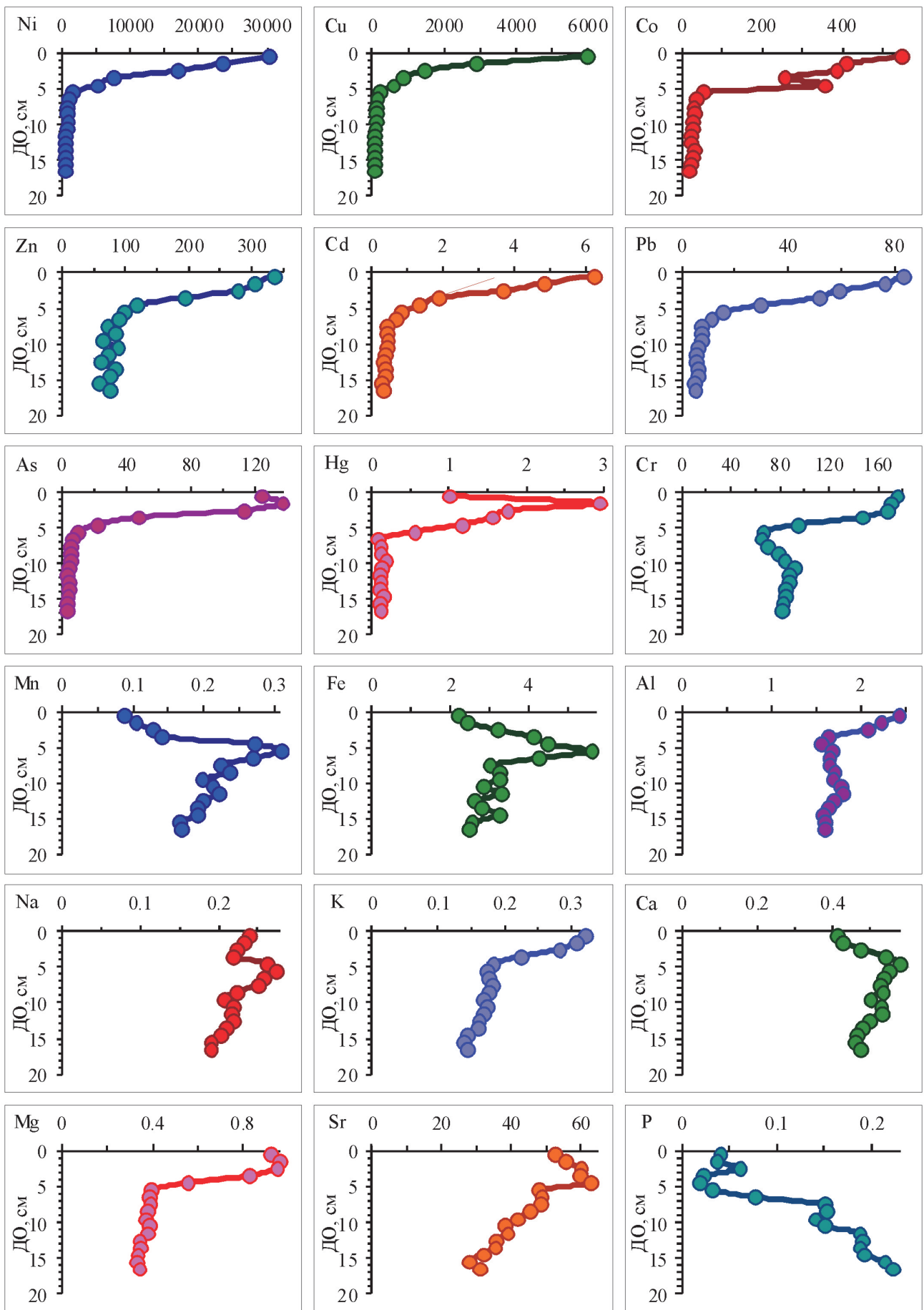


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Монче

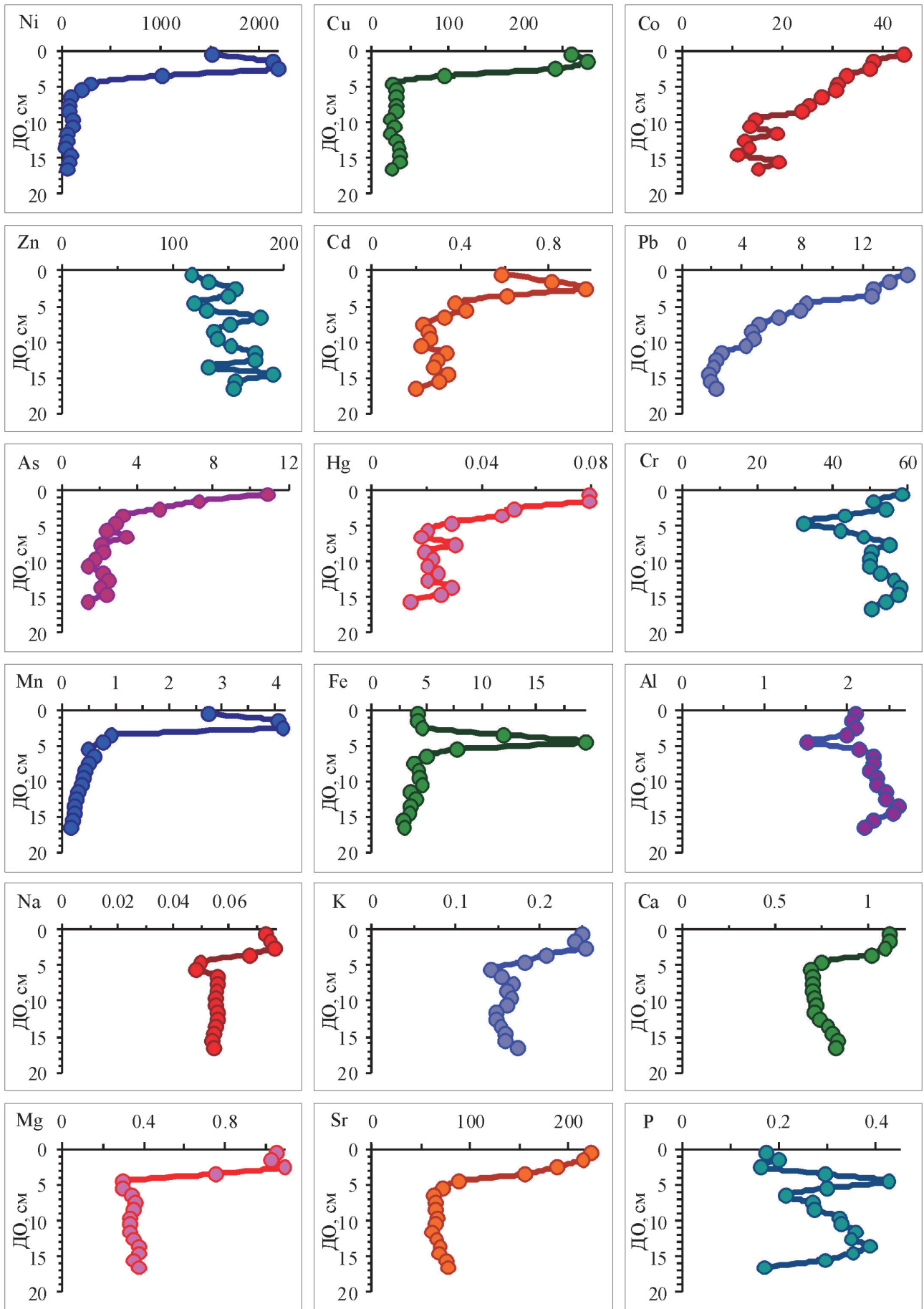


Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДЮ губы Куреньга

из хвостохранилища Оленегорского ГОКа. Как было сказано выше, поведение и распределение Mn и Fe зависят от кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий в водной толще и ДО. Как установлено предыдущими исследованиями [6], окисление растворенного оксида Fe^{2+} до нерастворимого Fe^{3+} происходит быстрее, чем окисление Mn^{2+} до оксидов Mn^{4+} . Поэтому максимальные содержания Fe, как правило, отмечаются на большей глубине ДО, чем Mn, что и зафиксировано в распределении этих металлов в ДО губы Куреньга (рис. 3).

Все исследуемые щелочные и щелочноземельные металлы увеличивают свои содержания по направлению к поверхности ДО губы Куреньга, что связано с разработкой Оленегорских месторождений железистых кварцитов (рис. 3). В состав горных пород вскрыши входят алюмосиликаты с высоким содержанием щелочных и щелочноземельных металлов. Увеличение содержания этих металлов (в 1,5–3 раза) в ДО губы Куреньга отмечается, как и ТМ, на глубине 4–5 см, что говорит о параллельности поступления тяжелых и щелочных и щелочноземельных металлов в повышенных содержаниях в данную акваторию озера.

Влияние стоков предприятий ОАО «Апатит» сказались в высоких концентрациях элементов в ДО губы Белой, содержащихся в апатитонефелиновых рудах и вскрышных породах (рис. 4). Это, прежде всего, элементы, присутствующие собственно в минералах апатите и нефелине – Ca, P, Na, K, Al, а также сопутствующие им щелочноземельный элемент Sr и редкоземельные элементы, не исследуемые в настоящей работе, но подробно описанные ранее по результатам исследований геохимической миграции элементов в оз. Имандра [3, 10]. На формирование химического состава ДО южной части плеса Большой Имандры оказывают также влияния сточные воды других предприятий, расположенных на его берегах, главным образом комбината «Североникель» (сказывается в увеличении концентраций Ni, Co, Cu, Cd и других халькофильных элементов в поверхностных слоях ДО), а также Оленегорского ГОКа (Fe, Mn) [5]. За более чем 80-летнюю историю деятельности ОАО «Апатит» в Белой губе накопилась значительная толща минеральных ДО. Основным образующим их материалом являются взвешенные частицы, поступающие из рудников, обогатительных фабрик и хвостохранилищ, то есть представляющие собой отходы добычи и обогащения апатитонефелиновой руды.

В вертикальном распределении Hg в ДО Белой губы четко отмечается приповерхностный максимум до 2,3 мкг/г на глубине 7–9 см (рис. 4), что практически на 2 порядка больше средних фоновых концентраций этого чрезвычайно токсичного халькофильного элемента в ДО озер Мурманской области [7]. Ниже максимальных содержаний на 2–3 см отмечаются содержания Hg, сопоставимые со средними фоновыми концентрациями Hg в ДО озер Мурманской области. Сопоставление с вертикальными профилями других загрязняющих элементов приводит к выводу, что по времени увеличение Hg в оз. Имандра совпадает с началом поступления элементов со стоками ОАО «Апатит» (P, Al, Ca, Na, Sr, K) и комбината «Североникель» (Ni, Cu, Co), но максимальные концентрации Hg фиксируются раньше по времени, чем максимумы основных загрязняющих ТМ – Ni и Cu. Можно пред-

положить, что максимальное поступление Hg происходило в 30–40-е гг. XX столетия (рис. 4). При проведении взрывных работ на первых этапах разработки апатитонефелиновых месторождений в капсуль-детонаторах использовалась гремучая ртуть. Во время Великой Отечественной войны на базе комбината «Апатит» работал цех по изготовлению зажигательных фосфорных бомб, в которых в качестве капсуля-воспламенителя использовалась гремучая ртуть. Есть еще несколько предположений по источникам поступления Hg в озеро, например, для освещения промышленных территорий применяются ртутные лампы низкого и высокого давления типа ДРЛ, которые, как правило, не утилизируются, а выбрасываются на свалки или отвалы рудников. Ртуть содержится в медицинских термометрах (в одном термометре примерно 2 г Hg). До середины XX века Hg широко применялась в манометрах, для проведения химических анализов, например количественного определения аммиака (реактив Несслера), и других целей. Вплоть до 1970-х гг. соединения Hg очень активно использовались в медицине, например: хлорид Hg (I) (каломель) – слабительное; меркузал и промеран – сильные мочегонные; хлорид Hg (II), цианид Hg (II), амидохлорид Hg и желтый оксид Hg (II) – антисептики (в том числе в составе мазей) и т. д.

В вертикальном распределении большинства исследуемых ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb) в ДО центральной части Йокостровской Имандры отмечаются два подповерхностных максимума – на глубинах 2 и 5 см (рис. 5). Максимум на глубине 5 см ДО, соответствующий пику производства ТМ на комбинате (1986–1987 гг.), что может являться маркером скорости осадконакопления. Пятисантиметровый слой ДО на этой акватории озера накопился за четверть века, следовательно, скорость осадконакопления здесь можно оценить равной 2 мм/год. Снижение концентраций ТМ в верхнем 1 см поверхностном слое ДО может быть связано с уменьшением выпуска продукции и как следствие – снижением поступления ТМ в озеро в составе сточных вод металлургического предприятия. Концентрации большинства ТМ в поверхностных слоях ДО Йокостровской Имандры меньше, чем в ДО Большой Имандры, что говорит о том, что основные источники загрязнения озера располагаются именно в Большой Имандре. Но, тем не менее, их концентрации к поверхности ДО Йокостровской Имандры значительно увеличиваются по отношению к фоновым содержаниям, например, Ni – более чем в 50 раз, Cu – 6, Pb – 8, Cd – 5, Co – 4 раза (рис. 5).

В вертикальном распределении концентраций Hg в ДО Йокостровской Имандры зафиксирован «классический» профиль, характерный для приоритетных загрязняющих ТМ, – в поверхностном слое отмечаются максимальные содержания 0,2 мкг/г, а самые глубокие слои ДО содержат Hg в количестве, сопоставимом со средними фоновыми концентрациями. Хотя и для Hg отмечается увеличение содержания на глубине 5 см, зафиксированное для других ТМ. Превышение фоновых концентраций Hg начинается с глубины 7 см (рис. 5), как и у большинства ТМ. Максимальное содержание As отмечено на глубине 8 см ДО Йокостровской Имандры (рис. 5).

По направлению к их поверхности в ДО Йокостровской Имандры происходит увеличение содержаний Mn и Fe до максимальных значений 2,5 и 24%,

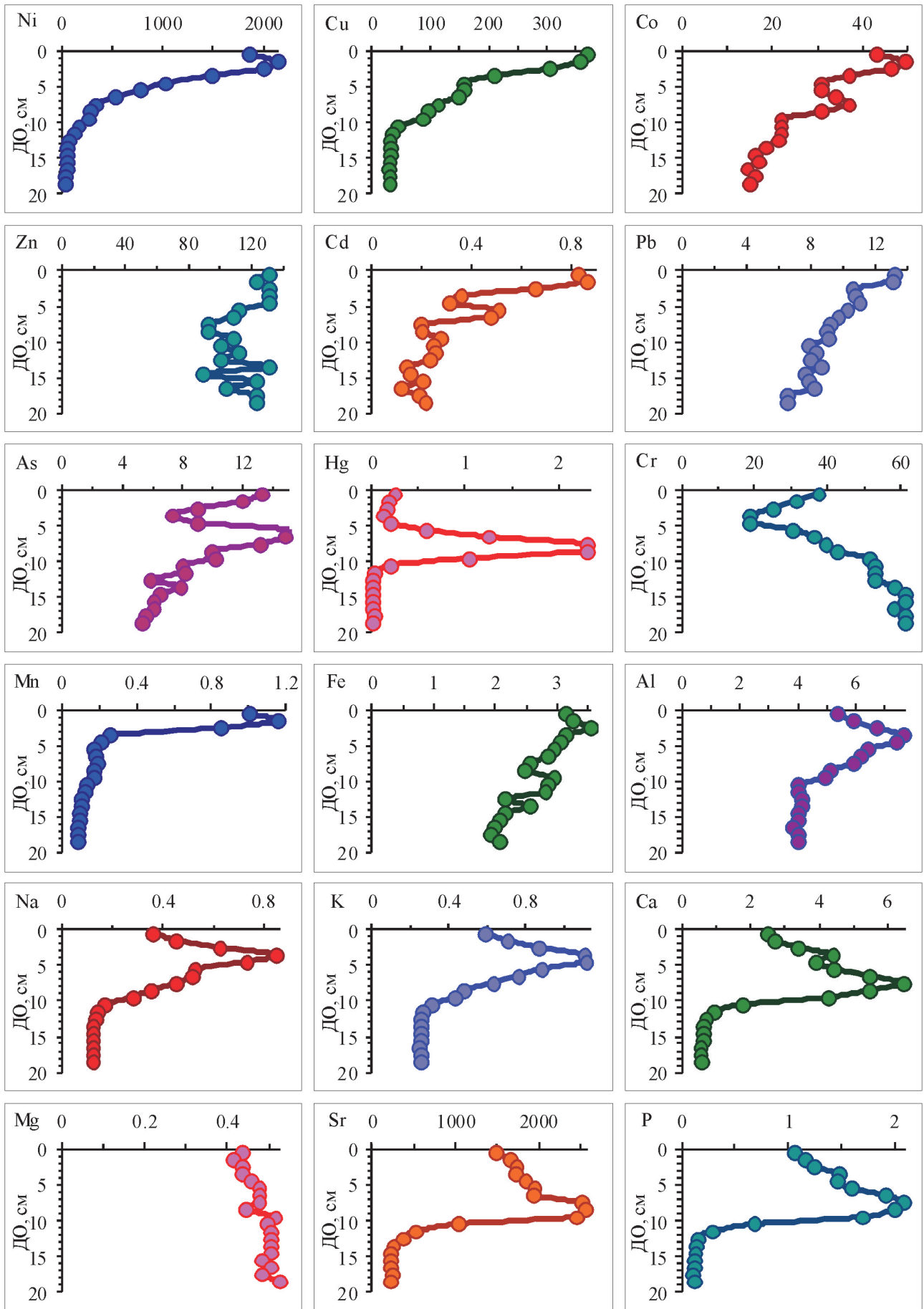


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Белой

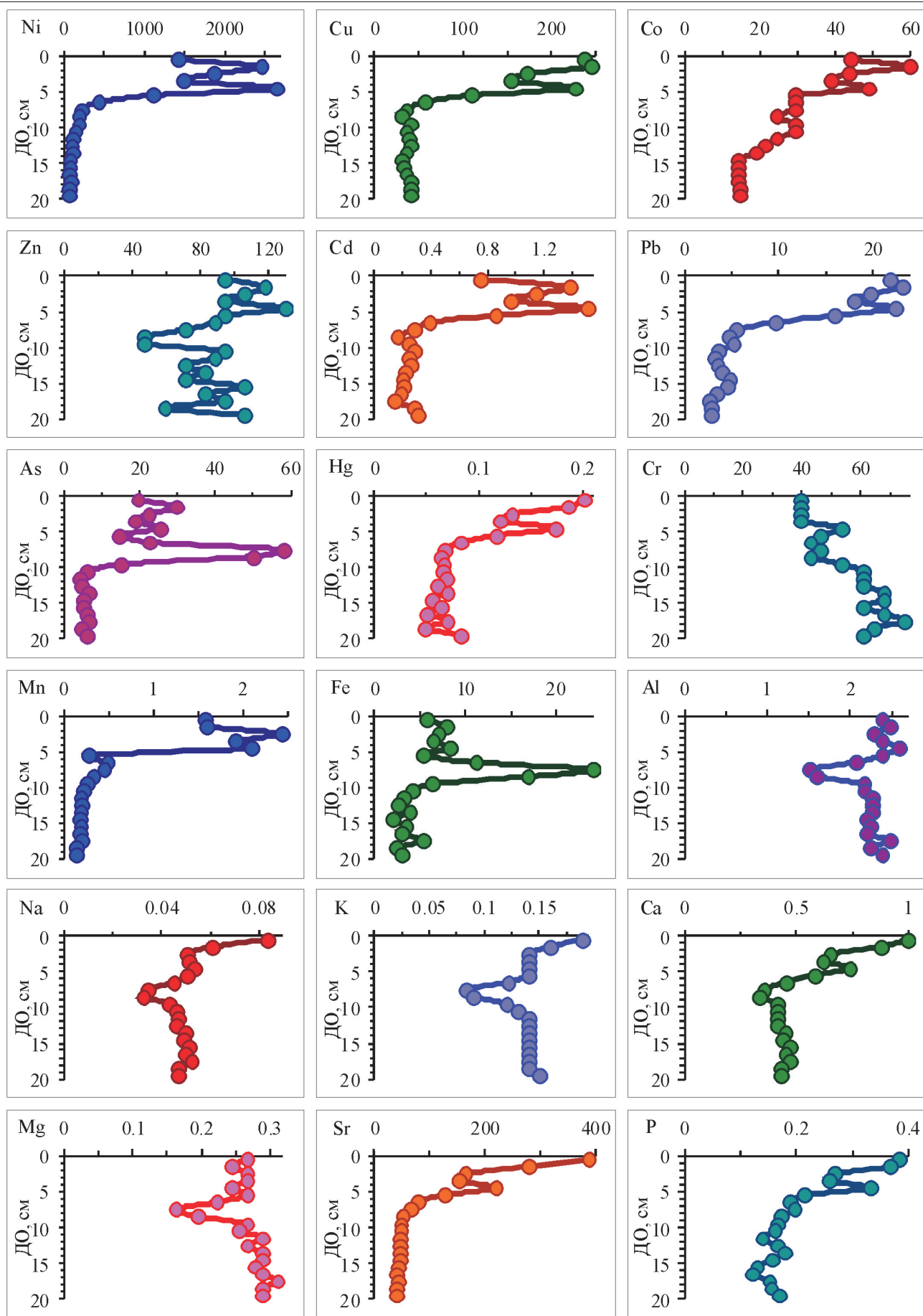


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО Йокостровской Имандры

что в 18 и 8 раз больше, чем концентрации в самых нижних фоновых слоях ДО соответственно (рис. 5), и связано как с влиянием сточных вод промышленных предприятий на берегах озера, так и изменениями физико-химических условий в толще воды и ДО. В пользу последнего предположения говорит то, что максимальные содержания Fe в ДО отмечаются на большей глубине ДО Йокостровской Имандры (8 см), чем Mn (3 см) (рис. 5).

В распределении щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca и Sr) отмечается общая тенденция увеличения содержания по направлению к поверхности ДО Йокостровской Имандры (рис. 5), что связано с влиянием сточных вод промышленных предприятий, главным образом ОАО «Апатит». Минимальные содержания этих металлов (а также Al, Mg) зафиксированы на глубине 7–9 см, что, вероятно, соответствует времени накопления осадков в связи со строительством отстойника-накопителя (хвостохранилища) АНОФ-II в 1960-х гг. (последняя дамба сооружена в 1968 г.), когда в озеро сбрасывались более крупные по размерам частицы, чем природный материал, формирующий ДО озера. Верхняя часть колонок накапливалась в результате поступления более тонкодисперсного материала после «осветления» хвостов в отстойнике-накопителе с высоким содержанием щелочных и щелочноземельных металлов. Скорость осадконакопления на этой акватории озера может быть оценена в среднем около 1,5 мм/год, учитывая время, прошедшее с возведения отстойника-накопителя АНОФ-II (более 40 лет), и глубину минимальных содержаний щелочных и щелочноземельных металлов и Al.

Биостанция находится в небольшой губе Йокостровской Имандры недалеко от Йокостровского пролива, где в относительно спокойных условиях происходит осадконакопление материала, поступающего из Большой Имандры, поэтому распределение элементов в ДО на этой станции отражает события, происходящие на водосборе и берегах вверх по направлению стоковых течений озера. Практически все исследованные элементы, как ТМ, так и щелочные и щелочноземельные металлы, Al и P повышают свои содержания по направлению к поверхности ДО биостанции (рис. 6), что является следствием загрязнения озера сточными водами в первую очередь комбината «Североникель» и ОАО «Апатит». Максимальные содержания основной части ТМ приурочены к поверхностному слою ДО. Исключение составляют As и Hg, наибольшие содержания которых отмечаются на глубине 4 и 3 см соответственно, что связано с историей поступления этих элементов в озеро. Наибольшие содержания щелочных и щелочноземельных металлов, а также Al и P приурочены к слою 3–5 см ДО биостанции, накопившемуся в период до возведения отстойника-накопителя АНОФ-II, когда большое количество взвешенного материала с высоким содержанием продуктов производства апатитнефелинового концентрата поступало в Белую губу Большой Имандры. Подобное увеличение содержания щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P, отмечено в толще ДО Белой губы, но на несколько большей глубине (рис. 4). Самое большое увеличение концентраций в поверхностных слоях относительно фоновых значений, отмеченных в наиболее глубоких частях колонки ДО биостанции, от-

мечено для Sr (более чем в 70 раз), Ni (в 35), Ca (в 30), Hg (в 22), Cu (в 10), P (в 9), Na (в 6 раз) (рис. 6).

Исследование химического состава толщи ДО Зашеечной губы, недалеко от истока единственной реки Нивы, вытекающей из оз. Имандра, вызывает интерес вследствие того, что через эту акваторию происходит сток практически всего растворенного и взвешенного материала, поступившего в оз. Имандра с промышленными стоками предприятий и с территории водосбора. На этой акватории вследствие снижения стоковых скоростей перед истоком р. Нивы создается механический барьер, способствующий интенсификации осадконакопления. В ДО Зашеечной губы к их поверхности было зафиксировано постепенное увеличение содержания и максимальные концентрации в поверхностном 1 см слое ДО всех исследуемых ТМ (рис. 7), что отражает влияние стоков промышленных предприятий в оз. Имандра (главным образом комбината «Североникель»), а также усиливающееся антропогенное влияние на озеро в целом в последние десятилетия. Наибольшее увеличение концентраций в поверхностном слое ДО по сравнению с фоновыми значениями отмечено для Cd (в 23 раза), Ni (в 13), As (в 11), Pb (в 7), Cu (в 4), Hg и Co (в 3 раза). Наряду с ТМ, наблюдается также рост содержаний по направлению к поверхности ДО щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P, что связано с влиянием как сточных вод ОАО «Апатит», так и работающего до недавнего времени Африкандского рудоуправления института «Механобр». Самое большое увеличение отмечено для Sr (в 18 раз), Ca (в 9), P (в 3,5), Na (в 3 раза) (рис. 7). Влияние изменений физико-химических условий в толще воды и ДО сказалось в наличии подповерхностных максимумов содержания Mn и Fe на глубине 2 и 5 см ДО Зашеечной губы соответственно (рис. 7). В толще ДО Зашеечной губы зафиксировано наибольшее содержание Fe в оз. Имандра – 32% на глубине 5 см. Это высокое содержание Fe делает возможным образование в ДО аутигенных минералов, таких как пирит, или других в виде ЖМК, описанных ранее [6, 13].

В Молочную губу Бабинской Имандры сбрасываются подогретые на 10–12 °С воды, используемые для охлаждения агрегатов Кольской АЭС и забираемые из Глубокой губы Йокостровской Имандры. Поэтому акватория Молочной губы испытывает, наряду с тепловым загрязнением, также и влияние относительно более загрязненных вод Йокостровской Имандры (рис. 8). Вследствие этого в колонке ДО Молочной губы наблюдается рост концентраций в поверхностных слоях Hg почти в 6 раз (с 0,010 до 0,058 мкг/г), Pb, Cd и Ni – примерно в 3 раза (с 5,4 до 20, с 0,14 до 0,45 и с 52 до 130 мкг/г соответственно), As – в 2 раза (с 3,7 до 7,3 мкг/г). Вместе с тем, отмечено снижение концентраций Mn, Fe, Sr, щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P по направлению к поверхности ДО (рис. 8).

Повышенные содержания Ni и Cu выявлены только в самом поверхностном слое, а в интервале 1–4 см наблюдается снижение концентраций этих металлов до минимальных значений в колонке ДО Молочной губы (рис. 8). Вероятно, это связано с аккумуляцией грубообломочного материала на акватории Молочной губы, связанной со строительством и первыми годами эксплуатации подводящего и сбросного каналов, да и в целом всей Кольской АЭС. Этот грубообломочный материал мог поступать не только по каналам, но и воздушным путем с пылью со строительных площадок.

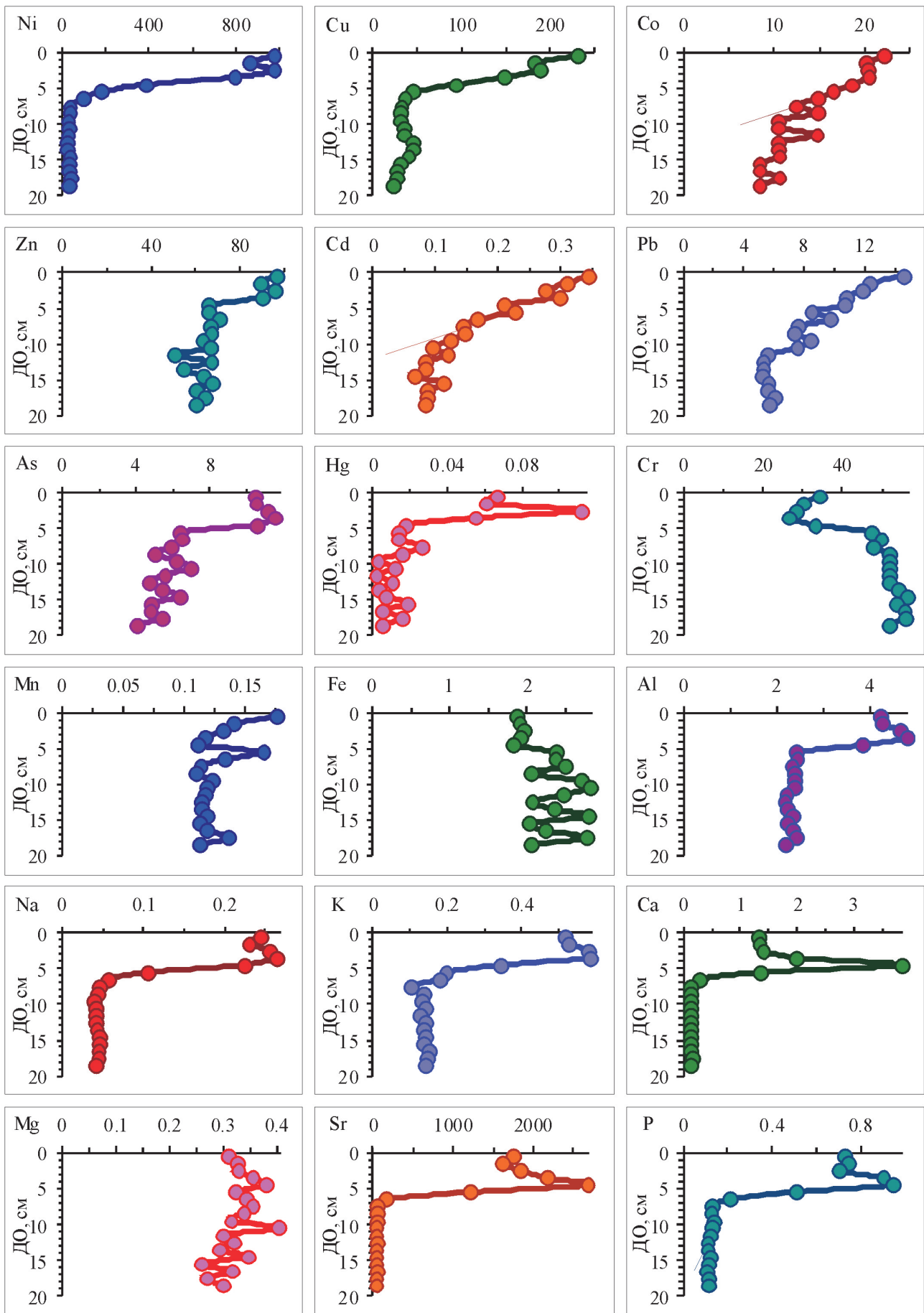


Рис. 6. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО биостанции

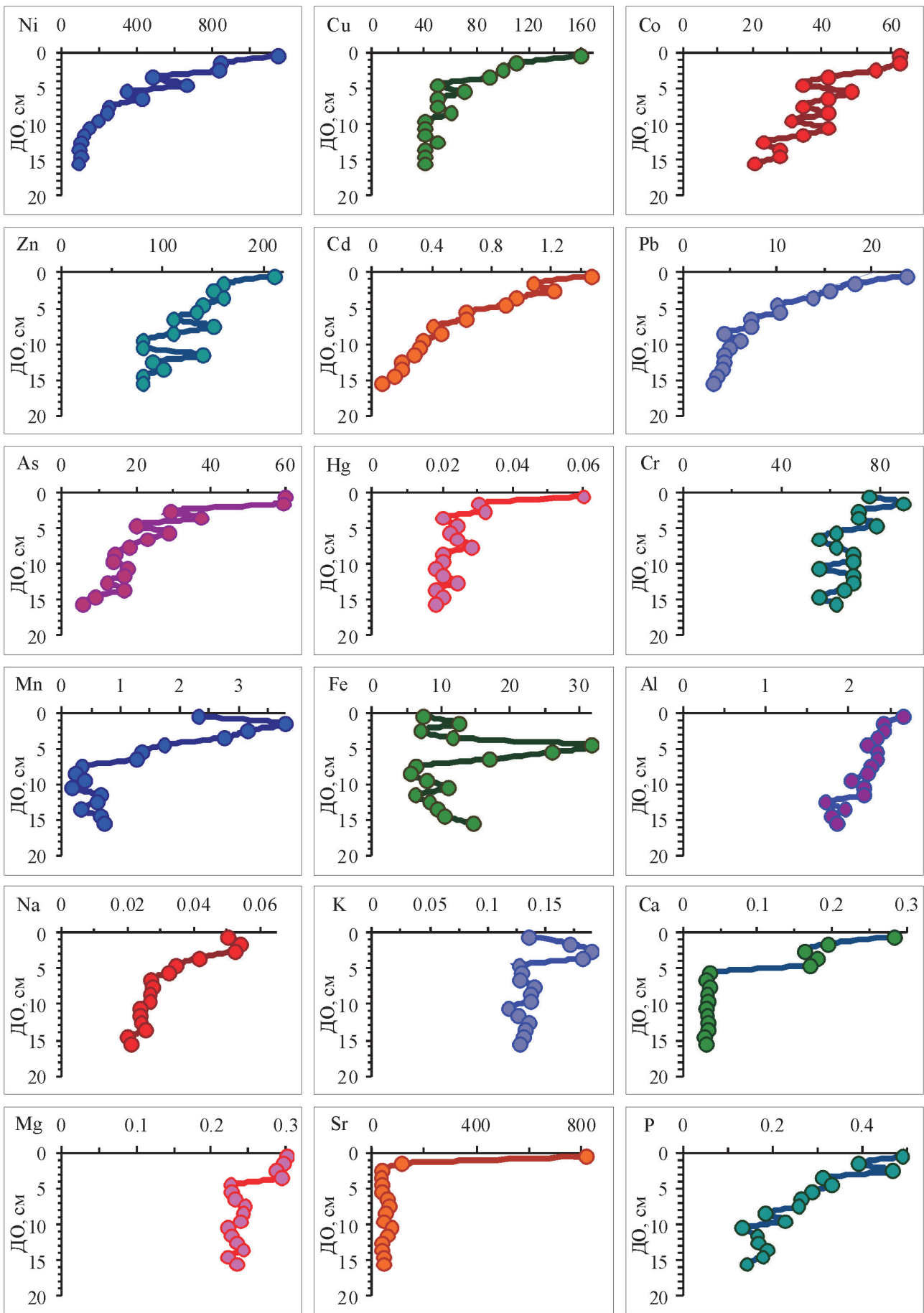


Рис. 7. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Зашеечной

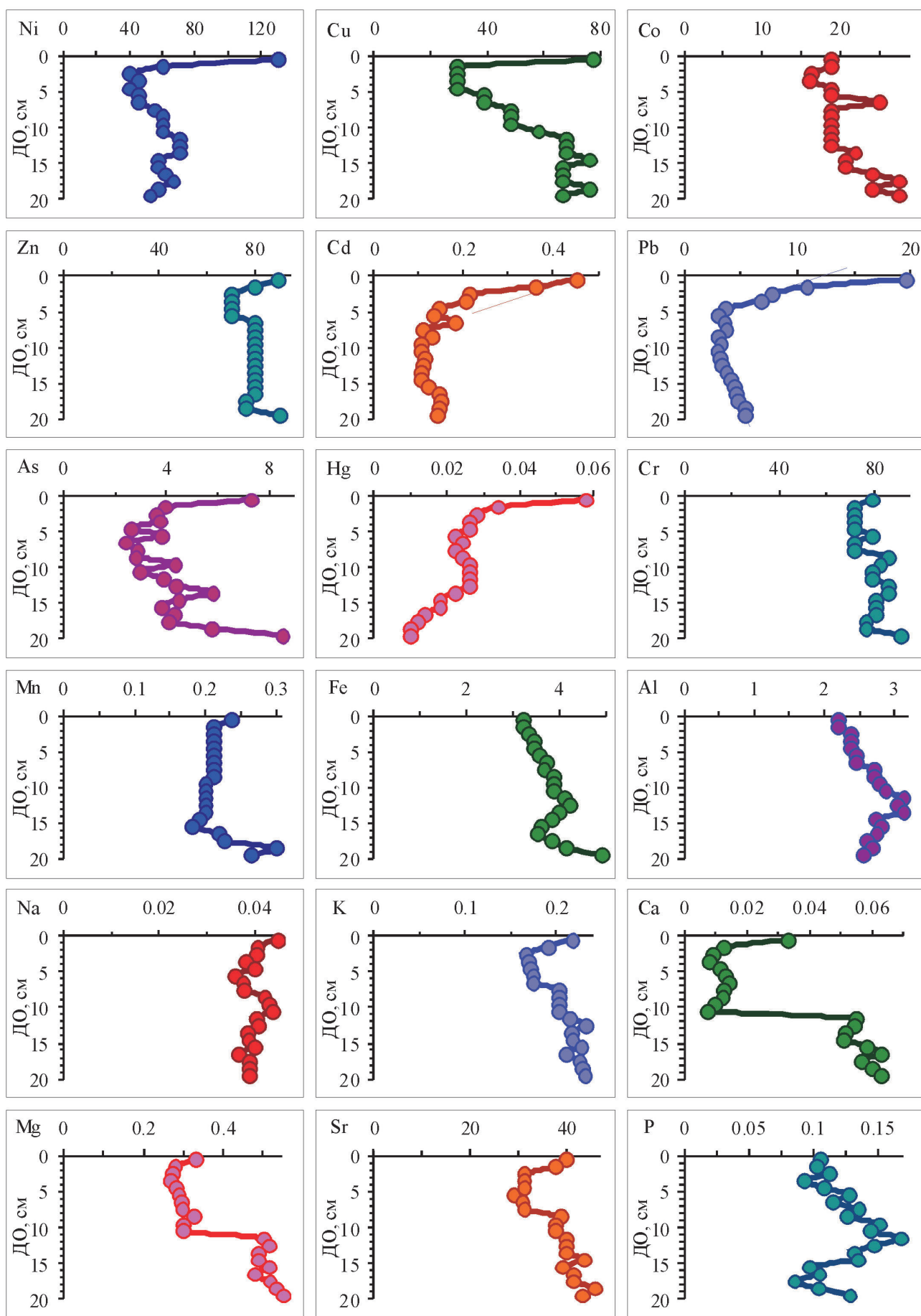


Рис. 8. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Молочной

Губа Уполокша, самая западная акватория Бабинской Иmandры, и оз. Иmandра в целом не подвержена прямому влиянию сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса. Но несмотря на это в губе Уполокша отмечен рост концентраций всех исследованных ТМ к поверхности ДО (рис. 9) вследствие аэротехногенного загрязнения водосбора Бабинской Иmandры. Вероятно также поступление загрязняющих веществ через каналы Кольской АЭС и протоку между Йокостровской и Бабинской Иmandрами – Широкую Салму – во время ветровых нагонных, а также компенсационных, течений восточного направления, особенно осенью (октябрь–ноябрь) перед ледоставом. Максимальные содержания большинства ТМ отмечены в поверхностном 1 см слое (рис. 9), и превышение над фоновыми значениями в самых глубоких частях колонки наибольшие для Pb (в 7 раз), Ni (в 5), Cu и Cd (в 4 раза). У металлов, чутко реагирующих на изменение окислительно-восстановительных условий, Fe и Mn, наибольшие содержания найдены на глубине 3 и 5 см соответственно, и, как было отмечено на других станциях, максимальное содержание Fe фиксируется, как правило, на большей глубине ДО, вследствие того, что образование труднорастворимых соединений Fe^{3+} происходит при меньших величинах Eh. Содержание Mn к поверхности ДО увеличивается более чем в 30 раз, а Fe – в 4 раза. Увеличение содержания щелочных и щелочноземельных металлов отмечено в поверхностных 2 см ДО, а минимум – в слое 2–4 см (рис. 9).

Закономерности распределения элементов в донных отложениях озера

Как было отмечено выше в описании результатов исследований, распределение элементов в колонках ДО оз. Иmandра имеет общие закономерности формирования химического состава. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава ДО, были проведены корреляционный (табл. 1) и факторный (табл. 2) анализы с использованием пакета Statistica (Version 6.1). При проведении корреляционного и факторного анализов учитывались результаты по 8 описанным выше колонкам ДО, так как они являются наиболее представительными из всего многообразия отобранных проб ДО за 25-летнюю историю исследований озера сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН.

Оз. Иmandра, как было отмечено ранее, благодаря довольно значительным размерам и различному удалению исследуемых акваторий от основных источников загрязнения, в различной степени подвержено влиянию сточных вод и атмосферных выбросов комбината «Североникель», ОАО «Апатит», «Олкон». Поэтому деятельность этих горно-металлургических предприятий, сточные воды и атмосферные выбросы как промышленных, так и городских хозяйственно-бытовых предприятий, а также трансграничные переносы из стран Западной Европы, помимо природных факторов, оказывают непосредственное влияние на формирование химического состава ДО озера. В толще ДО озера наблюдается увеличение по направлению к поверхности ДО концентраций практически всех исследованных элементов, что проявляется в достоверном высоком отрицательном значении коэффициента корреляции содержания элементов с глубиной слоя ДО (табл. 1). Исключением из этого списка являются Sr, Al и Mg.

Все исследованные ТМ имеют высокие значения коэффициентов корреляции с влажностью и содержанием органического материала, то есть параметрами ДО, которые тесно связаны с гранулометрическим составом ДО (табл. 1). В монографии [7] показано, что с увеличением содержания тонкодисперсных частиц и органического материала растет сорбционная способность ДО по отношению к загрязняющим веществам, в том числе и ТМ. Тонкодисперсные частицы и органический материал в водных системах характеризуются следующими важными с точки зрения поглотительной способности физическими и химическими свойствами: малый размер частиц; большая площадь поверхности; относительно высокая емкость катионного обмена; высокие значения отрицательного заряда поверхности вследствие разрушения связей на концах высокомолекулярных соединений и замещения Si^{4+} на Al^{3+} в слоистых алюмосиликатных минералах, в первую очередь глинистых.

Все исследованные ТМ имеют также высокие значения коэффициентов корреляции между собой (табл. 1), что также говорит в пользу предположения, что поступление ТМ в составе выбросов и стоков горно-металлургических предприятий, главным образом комбината «Североникель», является одним из главных факторов формирования химического состава ДО в современных условиях.

Ртуть показывает высокую достоверную корреляцию не только с другими ТМ, главным источником поступления которых является комбинат «Североникель», но и со всеми щелочными и щелочноземельными металлами, Al и P (табл. 1), которые поступают в оз. Иmandра не только в результате естественных процессов выветривания и эрозии слагающих водосбор озера горных пород, но и в составе горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, в основном ОАО «Апатит». Последнее утверждение подтверждается высокими достоверными коэффициентами корреляции между всеми щелочными и щелочноземельными металлами (за исключением Mg, корреляция которого не достоверна с Sr, Al и Ca), а также Al и P.

Mn и Fe, несмотря на то что их оксиды и гидрооксиды являются очень важными сорбентами загрязняющих веществ и ТМ [7], благодаря микроскопическим размерам, аморфности и слабой степени кристаллизации, большой площади поверхности, высокой емкости катионного обмена, высокому отрицательному заряду поверхности, не имеют высокой достоверной корреляционной связи с ТМ (табл. 1). Это связано с зависимостью распределения содержания Mn и Fe не только от наличия источника поступления этих металлов в составе сточных вод промышленных предприятий (главным образом, ОАО «Олкон»), но и от физико-химических условий (в основном это окислительно-восстановительная обстановка), что наглядно было показано в профилях распределения Mn и Fe в толще ДО исследованных станций озера (например, рис. 3, 5, 7, 9).

Факторным анализом (табл. 2) выявлены определяющие условия, сказывающиеся на формировании химического состава ДО. К их числу в первую очередь относится влияние промышленных предприятий и коммунально-бытовых стоков на территории водосбора озера. По всем исследуемым ТМ (Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg) отмечаются высокие отрицатель-

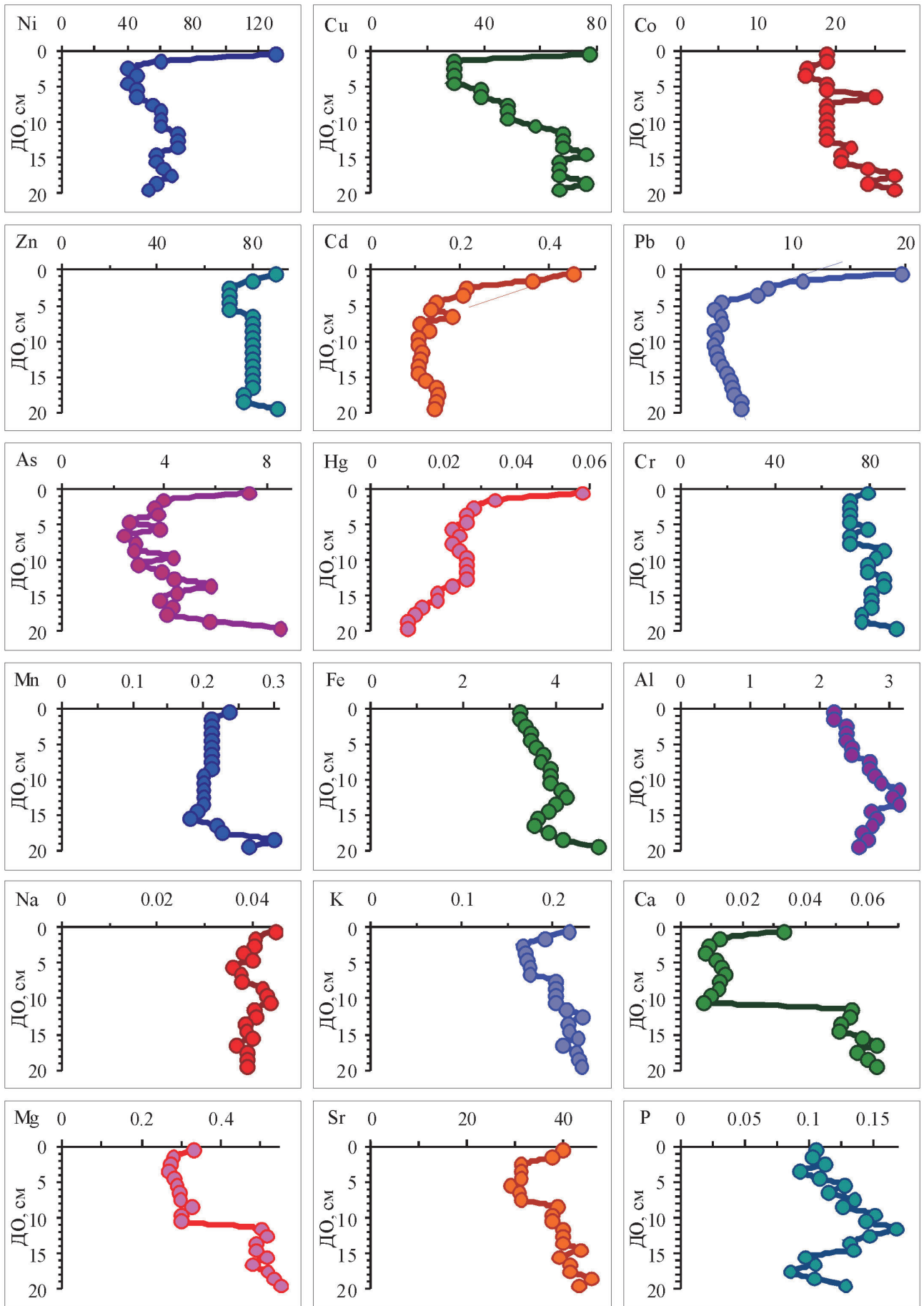


Рис. 9. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Уполокши

Табл. 1

**Коэффициенты линейной корреляции между концентрациями элементов
в толще донных отложений оз. Имандра***

	<i>h</i>	H ₂ O	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	Mn	Fe	Sr	Cr	Al	As	Hg	P	K	Na	Ca	Mg	
<i>h</i>	1,00																					
H ₂ O	-0,56	1,00																				
ППП	-0,20	0,65	1,00																			
Cu	-0,27	0,22	0,34	1,00																		
Ni	-0,31	0,25	0,41	0,96	1,00																	
Zn	-0,35	0,32	0,39	0,66	0,72	1,00																
Co	-0,30	0,25	0,43	0,87	0,94	0,70	1,00															
Cd	-0,43	0,33	0,42	0,91	0,96	0,78	0,91	1,00														
Pb	-0,51	0,30	0,36	0,82	0,89	0,69	0,87	0,92	1,00													
Mn	-0,50	0,21	-0,06	-0,01	0,01	0,25	0,00	0,20	0,22	1,00												
Fe	-0,22	0,08	-0,11	-0,08	-0,07	0,07	-0,01	0,04	0,01	0,34	1,00											
Sr	-0,32	0,10	0,00	0,01	0,00	0,04	-1,04	-1,01	0,01	-0,05	-0,19	1,00										
Cr	0,12	-0,15	0,11	0,54	0,59	0,35	0,63	0,54	0,55	-0,10	-0,06	-0,48	1,00									
Al	-0,15	-0,09	41,23	5,00	41,02	0,10	41,07	41,05	-0,06	-0,12	-0,26	0,82	-0,44	1,00								
As	-0,39	0,25	0,30	0,76	0,85	0,69	0,83	0,89	0,83	0,17	0,22	0,02	0,49	-0,05	1,00							
Hg	-0,24	0,12	0,30	0,49	0,61	0,44	0,64	0,57	0,61	-0,08	-0,12	0,37	0,34	0,23	0,58	1,00						
P	-0,29	0,11	-0,02	-0,03	-0,05	0,09	-0,07	-0,03	-0,06	0,00	-0,08	0,91	-0,49	0,81	0,00	0,43	1,00					
K	-0,27	-0,01	-0,14	0,11	0,10	0,13	0,06	0,06	0,09	-0,05	-0,23	0,77	-0,26	0,88	0,01	0,29	0,76	1,00				
Na	-0,28	0,19	0,26	0,20	0,21	0,18	0,21	0,19	0,17	0,11	-0,25	0,73	-0,22	0,76	0,12	0,43	0,75	0,86	1,00			
Ca	-0,24	0,08	0,03	0,02	0,01	0,10	-0,01	0,01	0,01	-0,02	-0,18	0,89	-0,42	0,79	-0,02	0,50	0,95	0,79	0,79	1,00		
Mg	-0,10	-0,23	0,00	0,41	0,45	0,39	0,42	0,39	0,50	0,19	-0,24	0,02	0,48	0,08	0,24	0,37	-0,04	0,30	0,16	0,16	1,00	

* Полу жирным выделены корреляции с уровнем достоверности $p < 0,05$. *h* – глубина слоя; H₂O – влажность; ППП – процент потерь при прокаливании.

Табл. 2

Факторная модель химического состава толщи ДО оз. Имандра

Параметры	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
<i>h</i>	0,481	0,223	-0,634
H ₂ O	-0,353	-0,042	0,720
ППП	-0,461	0,096	0,317
Cu	-0,884	0,155	-0,149
Ni	-0,950	0,175	-0,134
Zn	-0,793	0,058	0,118
Co	-0,925	0,203	-0,117
Cd	-0,956	0,188	0,050
Pb	-0,927	0,173	0,023
Mn	-0,143	0,076	0,569
Fe	0,032	0,231	0,534
Sr	-0,165	-0,921	0,046
Cr	-0,507	0,581	-0,454
Al	-0,098	-0,904	-0,165
As	-0,862	0,187	0,094
Hg	-0,712	-0,270	-0,192
P	-0,143	-0,937	0,102
K	-0,241	-0,862	-0,170
Na	-0,367	-0,813	-0,053
Ca	-0,201	-0,927	-0,020
Mg	-0,487	0,000	-0,456
Вес фактора, %	36,0	26,4	10,6

ные значения коэффициента в первом факторе (табл. 2), и вес этого фактора имеет подавляющее преимущество (36%). Первый фактор проявляется также и в положительном коэффициенте «глубины слоя» ДО (то есть с увеличением глубины ДО происходит уменьшение концентраций элементов). Первый фактор подтверждает неоднократно выдвигаемое предположение, что сточные воды и атмосферные выбросы горно-металлургических предприятий, главным образом комбината «Североникель», являются одним из главных факторов распределения ТМ в толще ДО оз. Имандра в современных условиях. Второй фактор (с весом 26%) объединяет щелочные и щелочноземельные металлы (за исключением Mg), Al и P – элементы, поступающие в озеро в составе сточных вод, главным образом, апатитонепелинового производства. Тем самым второй фактор подтверждает вывод, что влияние деятельности ОАО «Апатит» сказывается в формировании распределения щелочных и щелочноземельных металлов (за исключением Mg), Al и P, то есть элементов, входящих в состав минералов апатит и нефелин. Третьим фактором, имеющим сравнительно небольшой вес (11%), являются, вероятно, геохимические (физико-химические) условия, контролирующие процессы формирования химического состава ДО. В пользу этого предположения говорят высокие коэффициенты «глубины слоя» и влажности ДО, а также Mn и Fe – металлов, чутко реагирующих на изменения физико-химических условий в толще воды и ДО, в первую очередь, окислительно-восстановительной обстановки. Вероятно, на распределение последних металлов в толще ДО оз. Имандра, Mn и Fe, сказалась деятельность ОАО «Олкон», особенно на начальном этапе деятельности предприятия до середины 70-х гг. прошлого столетия, когда было введено 100%-е обратное водоснабжение.

Заключение

Установлено, что геохимический состав донных отложений (ДО) оз. Имандра за последнее 80 лет

претерпел значительные изменения по всей акватории вследствие как прямого поступления сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса (Большая и Йокостровская Имандры), так и аэротехногенного загрязнения водосбора озера и ветровых нагонных течений (Бабинская Имандра). Наибольший вклад в эти преобразования химического состава ДО оказывают горно-металлургические, горнодобывающие и горноперерабатывающие предприятия – комбинат «Североникель», ОАО «Апатит» и «Олкон», что подтверждено корреляционным и факторным анализом. В результате металлургической деятельности концентрации исследуемых ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Cr) в поверхностных слоях ДО озера увеличились в десятки, сотни и тысячи раз (например, Ni) по сравнению с фоновыми содержаниями, что сопоставимо с их содержанием в кондиционной руде. Установлено также влияние изменения физико-химических условий в толще воды и ДО озера на распределение Fe и Mn в ДО, что связано с зависимостью поведения этих элементов, главным образом, от окислительно-восстановительной обстановки. Влияние стоков предприятий добычи и переработки апатитонепелиновых руд проявилось в увеличении содержания щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Sr), а также P и Al. В вертикальном распределении Hg в ДО акватории, прилегающей к апатитонепелиновым разработкам, отмечено аномальное увеличение содержания (почти на 2 порядка больше фоновых концентраций), что связано с применением гремучей ртути в капсуль-детонаторах при проведении взрывных работ. Антропогенная нагрузка на озеро в последние десятилетия достигла громадных масштабов, что сказалось не только в увеличении содержания ТМ и других элементов в воде и ДО, а также в резком ухудшении экологического состояния озера и снижении видового разнообразия гидробионтов, упрощении их структуры, смене ранее доминирующих форм на устойчивые к загрязнению организмы.

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Барабанов АВ, Калинина ТА, Киселев АА, Краснобаев АИ. Гигант в Хибинах. М.: Руда и металлы; 1999.
2. Беус АА, Грабовская ЛИ, Тихонова НВ. Геохимия окружающей среды. М.: Недра; 1976.
3. Даувальтер ВА, Моисеенко ТИ, Родюшкин ИВ. Геохимия редкоземельных элементов в озере Имандра, Мурманская область. Геохимия. 1999;(4):376-83.
4. Даувальтер ВА, Моисеенко ТИ, Родюшкин ИВ, Кудрявцева ЛП, Шаров АН. Миграция и круговорот серы в субарктическом озере Имандра, загрязняющемся стоками горно-металлургического производства. Геохимия. 1999;(6):626-36.
5. Даувальтер ВА, Моисеенко ТИ, Кудрявцева ЛП, Сандимиров СС. Накопление тяжелых металлов в оз. Имандра в условиях его промышленного загрязнения. Водные ресурсы. 2000;(3):313-21.
6. Даувальтер ВА, Ильяшук БП. Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита. Геохимия. 2007;(6):680-4.
7. Даувальтер ВА. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та; 2012.
8. Калабин ГВ. Экодинамика техногенных провинций Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН; 2000.
9. Кашулин НА, Даувальтер ВА, Денисов ДБ, Валькова СА, Вандыш ОИ, Терентьев ПМ, Кашулин АН. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области. Вестник МГТУ. 2013;(1):98-107.

10. Моисеенко ТИ, Даувальтер ВА, Родюшкин ИВ. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты: Изд-во КНЦ; 1997.

11. Моисеенко ТИ, Даувальтер ВА, Родюшкин ИВ. Механизмы круговорота природных и антропогенных металлов в поверхностных водах Субарктики. Водные ресурсы. 1998;(2):231-43.

12. Моисеенко ТИ, Даувальтер ВА, Лукин АА, Кудрявцева ЛП, Ильяшук БП, Ильяшук ЕА, Сандимиров СС, Каган ЛЯ, Вандыш ОИ, Шаров АН, Шарова ЮН, Королева ИМ. (Под ред. ТИ Моисеенко). Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М: Наука; 2002.

13. Нерадовский ЮН, Даувальтер ВА, Савченко ЕЭ. Генезис фрамбоидального пирита в современных осадках озер (Кольский п-ов). Записки Российского минералогического общества. 2009;(6):50-55.

14. Перельман АИ. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа; 1983.

15. Рихтер ГД. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. Л., 1934.

16. Чижиков В.В. Гидрохимия и донные отложения озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. В кн.: Экосистемы озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во Кольского ФАН СССР; 1980:24-64.

Общий список литературы/Reference List

1. Varabanov AV, Kalinina TA, Kiselev AA, Krasnobayev A.I. Gigant v Hibinah. Moscow: Ruda i Metally, 1999. (In Russ.)

2. Beus AA, Grabovskaya LI, Tikhonova NV. Geokhimiya Okruzhayushey Sredy. Moscow: Nedra, 1976. (In Russ.)

3. Dauvalter VA, Moiseyenko TI, Rodyushkin IV. [Geochemistry of rare-earth elements in the Lake Imandra, Murmansk region]. Geokhimiya. 1999;(4):376-83. (In Russ.)

4. Dauvalter VA, Moiseyenko TI, Rodyushkin IV, Kudryavtseva LP, Sharov AN. [Migration and circulation of sulfur in the subarctic Lake Imandra polluted with the drains of mining and metallurgical industry]. Geokhimiya. 1999;(6):626-36. (In Russ.)

5. Dauvalter V.A., Moiseyenko T.I., Kudryavtseva L.P., Sandimirov S.S. [Accumulation of heavy metals in the Lake Imandra under industrial pollution]. Vodnye Resursy. 2000;(3):313-21. (In Russ.)

6. Dauvalter VA., Ilyashuk BP. [The conditions of formation of ferromanganese concretions in the bottom deposits of lakes located within the Baltic crystal Shield]. Geokhimiya. 2007;(6):680-4. (In Russ.)

7. Dauvalter VA. Geokologiya Donnyh Otlozheniy Ozer. Murmansk: Izdatel'stvo Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, 2012. (In Russ.)

8. Kalabin GV. Ekodinamika Tehnogennykh Provintsiy Severa. Apatity: Izdatel'stvo KNS RAN, 2000. (In Russ.)

9. Kashulin NA, Dauvalter VA, Denisov DB, Valkova SA, Vandysh OI, Terentyev PM, Kashulin AN. [Some aspects of the current state of fresh-water resources of Murmansk region]. Vestnik MGTU. 2013;(1):98-107. (In Russ.)

10. Moiseyenko TI., Dauvalter V.A., Rodyushkin I.V. Geokhimeskaya Migratsiya Elementov v Subarkticheskom Vodoyeme (Na Primere Oзера Imandra). Apatity: Izdatel'stvo KNC, 1997. (In Russ.)

11. Moiseyenko TI, Dauvalter VA, Rodyushkin IV. [Mechanisms of circulation of natural and anthropogenic metals in the surface waters of the Subarctic region]. Vodnye Resursy. 1998;(2):231-43. (In Russ.)

12. Moiseyenko TI, Dauvalter VA, Lukin AA, Kudryavtseva LP, Ilyashuk BP, Ilyashuk EA, Sandimirov SS, Kagan LYa, Vandysh OI, Sharov AN, Sharova YuN, Koroleva IM. Antropogennyye Modifikatsii Ekosistemy Oзера Imandra. Moscow: Nauka; 2002. (In Russ.)

13. Neradovskiy YuN, Dauvalter VA, Savchenko EE. [Genesis of framboidal pyrites in the present-time sediments of lakes (The Kola Peninsula)]. Zapiski Rossiyskogo Mineralogicheskogo Obschestva. 2009;(6):50-5. (In Russ.)

14. Perelman AI. Geokhimiya Landshafta. Moscow: Vysshaya Shkola; 1983. (In Russ.)

15. Rikhter GD. Fiziko-Geograficheskiy Oчерk Oзера Imandra i Yego Basseyna. Leningrad, 1934. (In Russ.)

16. Chizhikov VV. [Hydrochemistry and bottom deposits of the Lake Imandra under the influence of technogenic pollution]. In: Ekosistemy Oзера Imandra pod Vliyaniem Tekhnogennogo Zagryazneniya. Apatity: Izdatel'stvo Kolskogo FAN SSSR;1980:24-64. (In Russ.)

17. Förstner U, Wittmann GTW. Metal Pollution in the Aquatic Environment. N.Y.: Springer-Verlag, 2nd revised edition, 1981.

18. Gregurek D, Melcher F, Pavlov VA, Reimann C, Stumpf EF. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia. Miner. Petrol. 1999;(65):87-111.

19. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. Water Res. 1980(14):975-1001.

20. Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As-NLH, Nr. 2, 1979.