

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕРА ИМАНДРА

В двух томах

Том 1
ГИДРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА

В. А. Даувальтер, С. С. Сандимиров, Д. Б. Денисов,
В. И. Демин, Н. А. Кашулин, П. М. Терентьев, С. А. Валькова,
О. И. Вандыш, И. М. Королева, Л. П. Кудрявцева, Е. М. Зубова,
О. В. Петрова, А. А. Черепанов

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕРА ИМАНДРА

В двух томах

Том 1

ГИДРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Апатиты
Издательство ФИЦ КНЦ РАН
2023

УДК 558.5:502.72
Э 40

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН.

Коллектив авторов:

Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Демин В. И., Кашулин Н. А.,
Терентьев П. М., Валькова С. А., Вандыш О. И., Королева И. М., Кудрявцева Л. П.,
Зубова Е. М., Петрова О. В., Черепанов А. А.

Рецензенты:

Удачин В. Н. — д-р геол.-минерал. наук, директор Южно-Уральского
федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН;
Шаров А. Н. — д-р биол. наук, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Э40 **Экологическое состояние озера Имандра** : в 2 томах. Т. 1 : Гидролого-геохимические
условия / коллектив авторов ; под редакцией Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтера,
С. С. Сандимирова ; Ин-т проблем промышленной экологии Севера ; ФИЦ КНЦ РАН. —
Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. — 221 с. : ил.

ISBN 978-5-91137-484-6 (т. 1)
ISBN 978-5-91137-485-3

Обобщены проведенные в последние десятилетия исследования динамики абиотических показателей экосистемы Имандры в условиях почти вековой антропогенной нагрузки на само озеро и его водосбор. Приводится исторический очерк освоения и изучения озера в контексте с развитием крупных производств на его берегах и водосборе. Представлены данные, характеризующие климат водосбора, показатели морфометрии озера, термического и ледового режима, а также анализ гидрохимических параметров качества вод (взвеси, рН, электропроводность, газовый режим, ионная композиция, биогенные элементы и органическое вещество, микроэлементы, включая тяжелые металлы). Дано представление о механизмах формирования качества вод в современный период. Представлены оригинальные данные о территориальном распределении макро- и микроэлементов в донных отложениях, о накоплении органического вещества и тяжелых металлов. Реконструированы, как отражение динамики качества вод, осадконакопление и картина изменения геохимического состава донных отложений. Дана оценка процессов минералообразования, отражающих изменение геохимической обстановки в толще донных отложений.

Монография предназначена для широкого круга читателей — специалистов и студентов в области гидрохимии и геохимии охраны окружающей среды и экологии.

УДК 558.5:502.72

Фото на обложке — Жиганов В. Ю.

Научное издание
Редактор С.А. Шарам
Технический редактор В.Ю. Жиганов
Подписано в печать 14.03.2023. Формат бумаги 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 19,34. Заказ № 5. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-91137-484-6 (т. 1)
ISBN 978-5-91137-485-3
doi: 10.37614/978.5.91137.484.6

© Коллектив авторов, 2023
© ИППЭС КНЦ РАН, 2023
© ФИЦ КНЦ РАН, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА.....	9
Литература.....	13
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	15
2.1. Гидрологические наблюдения.....	15
2.2. Гидрохимические исследования.....	16
2.3. Исследования донных отложений.....	17
Литература.....	21
3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ БАССЕЙНА ОЗЕРА ИМАНДРА.....	22
3.1. Современные климатические нормы.....	23
3.2. Долговременные изменения температуры воздуха и прогнозы до 2050-х годов.....	31
3.3. Атмосферные осадки.....	34
3.4. Влажность воздуха.....	37
3.5. Ветер.....	38
3.6. Облачность. Продолжительность солнечного сияния.....	39
Литература.....	40
4. АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА.....	42
4.1. Горнодобывающая промышленность.....	42
4.2. Металлургическая промышленность.....	44
4.3. Энергетический комплекс.....	46
4.4. Хозяйственно-бытовые стоки.....	48
4.5. Аэротехногенное загрязнение.....	49
Литература.....	50
5. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ИМАНДРА.....	51
5.1. Морфометрическая характеристика.....	51
5.2. Режим уровней воды.....	57
Литература.....	58
6. ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ИМАНДРА.....	59
6.1. Минерализация воды и основной ионный состав.....	59
6.2. Соотношение ионов.....	69
6.3. Сезонная динамика минерализации и ионного состава.....	72
6.4. Водородный показатель рН.....	75
6.5. Органическое вещество.....	76
6.6. Биогенные вещества.....	78
6.7. Микроэлементы.....	94
Литература.....	107

7. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ.....	110
7.1. Характеристика донных отложений в многолетнем ряду исследований.....	110
7.2. Влажность и органическое вещество в донных отложениях.....	113
7.3. Фоновые содержания элементов в донных отложениях.....	118
7.4. Реконструкция осадконакопления донных отложений как отражение динамики качества вод.....	123
7.5. Территориальное распределение элементов в поверхностном слое донных отложений.....	142
7.6. Накопление основных элементов-загрязнителей в озере Имандра.....	173
7.7. Комплексная оценка состояния озера Имандра по результатам исследования химического состава донных отложений.....	178
7.8. Современное минералообразование в донных отложениях озера Имандра.....	192
Литература.....	207
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	217

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗРФ — Арктическая зона Российской Федерации
АМСГ «Апатиты» — станция «Апатиты» Федерального государственного бюджетного учреждения «Главный центр информационных технологий и метеорологического обслуживания авиации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»
АНОФ — апатитонепелиновая обогатительная фабрика
ВМО — Всемирная метеорологическая организация
ВНИИ ГМИ — МЦД — Всероссийский научно-исследовательский институт Гидрометеорологической информации — Мировой центр данных
ГМС — гидрометеорологическая станция
ГОК — горно-обогатительный комбинат
ГосНИОРХ — Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного хозяйства
ГОУП — государственное областное унитарное предприятие
ГЭС — гидроэлектростанция
ДО — донные отложения
ЖМК — железомарганцевые конкреции
ЖМО — железомарганцевые образования
ИППЭС КНЦ РАН — Институт проблем промышленной экологии Севера — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»
Кольская АЭС, КАЭС — Кольская атомная электростанция
КГМК — Кольская горно-металлургическая компания
КМП — комплексный мониторинговый полигон
КО — коэффициент осаждения
КОС — канализационные очистные сооружения
КФАН СССР — Кольский филиал Академии наук Союза Советских Социалистических Республик
ЛГУ — Ленинградский государственный университет
МГЭИК — Межправительственная группа экспертов по изменению климата
Мурманское УГМС — Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ОСЧ — класс особой чистоты
ПВ — поверхностные воды
ПИНРО — Полярный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
ПО — перманганатная окисляемость
ППП — потери при прокаливании
РТК — репрезентативные траектории концентраций
СКО — среднеквадратичное отклонение
СЭМ — сканирующий электронный микроскоп
ТМ — тяжелые металлы
ТОС — общий органический углерод (total organic carbon)
ТЭС — теплоэлектростанция
ТЭЦ — теплоэлектроцентраль

AAS — метод определения концентраций элементов с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии

B — биомасса зоопланктона

B_{phyto} — биомасса фитопланктона

BPI — биопродуктивность водных экосистем

C_d — степень загрязнения донных отложений озера

C_f — коэффициент загрязнения элементом донных отложений озера

Chla — содержание хлорофилла «a»

Eh — окислительно-восстановительный потенциал

E_r^i — коэффициент экологической опасности элемента

ICP — метод определения концентраций элементов с помощью индуктивно связанной плазмы

N — численность зоопланктона

$N_{\text{общ}}$ — содержание общего азота

$N_{\text{орг}}$ — содержание органического азота

pH — водородный показатель

$P_{\text{общ}}$ — содержание общего фосфора

RI — индекс потенциальной экологической опасности

S — индекс сапробности

St^i — седиментологический коэффициент токсичности

Tr^i — коэффициент токсичности элемента

ВВЕДЕНИЕ

Крупные озера Арктической зоны России, будучи важнейшим природным ресурсом, наряду с водохранилищами и озерно-речными системами относятся к важнейшим составляющим энергетики и промышленности, являются источником питьевой воды и продовольствия, выступают составной частью жизненной среды человека. В силу особой чувствительности природных систем Арктики, находящихся в условиях пограничных или критических параметров, когда даже незначительные колебания последних ведут к значимым изменениям природных комплексов, флоры, фауны, растительности, седиментационной обстановки, гидрологических и гидрохимических параметров водоемов и прилегающей суши, экосистемы крупных озер несут информацию, связанную не только с локальными и региональными палеоэкологическими особенностями, но и с усиленными сигналами глобальных событий. При этом они являются и наиболее уязвимыми компонентами природы Арктики, подверженными разного рода загрязнениям и трансформациям, интегрирующими все изменения, происходящие на территории их водосборов. В этом отношении озеро Имандра, относится к наиболее интересным модельным объектам. Его экосистема формировалась длительное время, по крайней мере в течение последних 10 тысяч лет. На его водосборе расположены ряд промышленных предприятий, построена атомная электростанция на прямоточной системе охлаждения, проживает около 170 тысяч человек (в 1980–1990-х гг. проживало около 300 тысяч), по берегам водоема проходят автомобильная и железная дороги федерального назначения, сток из озера зарегулирован. Почти столетие озеро Имандра, а также водоемы и водотоки его водосбора используются как источник технического и питьевого водоснабжения, в интересах рекреации и туризма, рыбного промысла. В конце 1920-х гг. здесь было положено начало разработке и освоению месторождений полезных ископаемых, что привело к появлению комплекса негативных явлений и загрязнению водоема, а его сложная морфология обуславливает выраженную зональность различных видов воздействий, что позволяет проводить сравнительные исследования. Наряду с уязвимостью из-за своего географического положения в высоких широтах, экосистема озера Имандра имеет и существенную экологическую устойчивость благодаря длительной эволюции и его крупным размерам. В то же время выявлены тренды деградации водоема и снижения его ресурсного потенциала.

Учитывая относительно короткий период детального изучения водоема, начавшийся после организации ИППЭС КНЦ РАН, что характерно для большей части арктических водных систем, важнейшим направлением исследований являются палеолимнологические реконструкции, позволяющие проследить хронологию трансформации озера. Актуальность этих исследований связана и с недостаточной изученностью палеогеографических обстановок в бассейне озера Имандра, которые в целом определяли развитие и формирование его экосистемы в целом и качество пресных вод в частности. Малоизученными являются и гидробиологические ресурсы пресных вод арктических регионов. Изменяется скорость образования первичной продукции, нарушаются циклы биогенных элементов в пресноводных экосистемах, происходит эвтрофикация вод. Механизмы этих процессов не до конца понятны и требуют детального изучения. В свою очередь, изменение скорости и направленности сукцессий арктических водоемов способствует продвижению на север организмов, которые характерны

для более южных областей, приводит к инвазии новых видов гидробионтов, и всплескам численности инвазивного типа аборигенных видов, к радикальным перестройкам видовой структуры сообществ гидробионтов, включая снижение численности или полное исчезновение ценных промысловых видов. Кроме того, на качестве гидробиологических ресурсов отразилась природная и антропогенная трансформация окружающей среды и климата арктических регионов, смещение показателей арктической климатической системы в сторону потепления. В этом отношении особую актуальность приобретают проблемы накопления токсичных веществ в различных компонентах экосистем, в первую очередь тяжелых металлов, включая ртуть и свинец, являющихся глобальными загрязнителями пресных вод. Наметившиеся процессы деградации экосистемы озера показывают неэффективность существующих подходов управления ресурсами поверхностных вод Арктической зоны РФ. Накапливаемая информация о состоянии отдельных компонентов экосистемы в малой степени доступна для принятия управленческих решений, в существующих критериях качества не учтены региональные особенности. Это требует разработки принципов экологических информационных систем, позволяющих проводить оценку состояния экосистемы водоема в целом и принимать научно обоснованные управленческие решения.

Таким образом, комплексная оценка современного состояния и динамики развития экосистемы озера Имандра, выявление индикаторных параметров ее экологической устойчивости в условиях глобальных изменений климата и антропогенной трансформации окружающей среды, разработка интегральных региональных показателей качества вод и критических нагрузок, интегрированные в единую экологическую информационную систему в качестве научной основы новых подходов управления ресурсами пресных вод Арктики, представляется весьма актуальной задачей исследования, решение которой будет способствовать сохранению и рациональному использованию их ресурсного потенциала.

Данная книга является продолжением монографических работ, в которых описывается экологическое состояние озера Имандра в условиях антропогенного воздействия:

1. «Экосистема озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения» (1980).
2. «Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья» (1985).
3. «Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера» (1990).
4. «Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера)» (1996).
5. «Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра)» (1997).
6. «Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики» (1997).
7. «Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра» (2002).
8. «Экологическое состояние наземных и водных экосистем в районе Кольской АЭС» (2010).
9. «Современное состояние экосистем в районе Кольской АЭС (Мурманская область)» (2020).

1. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА

Самым ранним свидетельством об озере Имандра является его изображение на географической карте Олая Магнуса, составленной в 1539 г. (Рихтер, 1934)*. Первым научным исследованием оз. Имандра принято считать работу Николая Васильевича Кудрявцева. Весной 1880 г. по приглашению Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей он принял участие в ученой Мурманской экспедиции в качестве геолога и коллектора по минералогии и ботанике. Итогом его исследований стало краткое лимнологическое описание Имандры и составление списка растений, встреченных по его берегам и на островах (Кудрявцев, 1882).

В начале 1920 г. А. Е. Ферсманом совместно с А. П. Карпинским и А. П. Герасимовым совершена поездка по Мурманской железной дороге для предварительного ознакомления с ископаемыми богатствами этой неразведанной области. Собранные в районе оз. Имандра образцы пород (нефелиновых сиенитов) с незнакомыми минералами глубоко заинтересовали его, и уже осенью того же года была организована первая экспедиция в Хибины, где и были обнаружены железорудные месторождения Имандры. Все эти открытия надолго определили судьбу края (см.: Отечественные..., 1959).

Созданная в 1924 г. Мурманская биологическая станция внесла существенный вклад в развитие ботанико-географических исследований озера Имандра (Зернов, 1948; Токин, Хасанкаев, 1981). Летом и осенью 1925 г. гидрологические, геологические, почвенно-геологические и зоологические работы были продолжены. Выполнено морфологическое и батиметрическое исследование водоема. Были получены данные о летнем термическом режиме и распределении грунтов, о количестве в воде кислорода, гидрокарбонатов и химизму некоторых притоков (Рихтер, 1926, 1934; Верещагин, 1932). В 1920–1930-е гг. на Имандре работали участники Кольского альгологического отряда Главного ботанического сада СССР, Кольской комплексной экспедиции Академии наук СССР и Государственного гидрогеологического института вод под руководством Л. О. Паллона.

В начале 1930-х гг. заметно увеличился размах лимнологических работ. Ленинградский научно-исследовательский ихтиологический институт и Ленинградское управление гидрометеослужбы продолжили изучение водоемов, инициированное Мурманской биологической станцией. Перед Второй мировой войной была закончена лишь общая характеристика оз. Имандра, составлены списки видов бентоса и планктона, даны первые сводки о видовом составе рыб (Материалы..., 1940; Берг, Правдин, 1948).

1960-е годы

Комплексное изучение озера в период с 1959 по 1963 г. осуществлялось с привлечением специалистов из Государственного научно-исследовательского института озерного и речного хозяйства (ГосНИОРХ) и Полярного научно-

* Цит. по: Материалы по истории русской картографии. Вторая серия. Вып. 1: Карты всей России, северных ее областей и Сибири / собрал В. А. Кордт. Киев, 1906.

исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО) по договору с Мурманским управлением морского лова.

Были собраны данные по морфометрическим характеристикам и гидрохимическому режиму оз. Имандра, особенностям залегания грунтов и их химическому составу, проведено обследование всех трех плесов Имандры с целью изучения фито- и зоопланктона, бентоса, ихтиофауны. Велись наблюдения за температурным режимом воды, замерялись глубины, анализировался характер дна и берега.

В 1964 г. по инициативе Г. В. Беляевой в лаборатории энергетики Горно-металлургического института была создана группа водохозяйственных проблем. В ее задачи входила организация комплексных исследований оз. Имандра, как зарегулированной водной системы, с целью изучения вредного воздействия колебаний уровня режима и сточных вод промышленных предприятий на хозяйственные качества водоема.

Комплексная экспедиция Института озероведения АН СССР в 1967–1970 гг. провела обследование ряда озер Кольского полуострова, расположенных в различных ландшафтных условиях, в том числе Имандры. Результаты исследований изложены в двухтомном сборнике «Озера различных ландшафтов Кольского полуострова» (1974) и в монографии «Большие озера Кольского полуострова» (1976).

1970-е годы

Комплексные исследования озера с целью оценки хозяйственного состояния и подготовки рекомендаций по рациональному использованию велись сотрудниками группы водохозяйственных проблем лаборатории энергетики (затем преобразована в Отдел энергетики КФАН СССР) Горно-металлургического института КФАН СССР на плесах Йокостровская и Бабинская Имандра, частично — Большая Имандра. Основные результаты гидрохимических съемок систематически публиковались в «Гидрохимических бюллетенях» (материалы наблюдений за загрязненностью поверхностных вод на территории деятельности Мурманской УГМС). За это время была дана характеристика термического и динамического режима водоемов, рассмотрены условия формирования химического состава воды, характера, интенсивности и динамики загрязнения озера промышленными отходами. На основе гидробиологических и ихтиологических исследований была составлена количественная и качественная характеристика зообентоса и оценено его значение как корма для рыб-бентофагов. Новым стресс-фактором стало тепловое загрязнение водами Кольской АЭС (с 1973 г.), что привело к изменению гидрологического режима прилегающей территории. Определены общие микробиологические характеристики, и изучено влияние промышленного загрязнения на развитие микрофлоры озера. На основе результатов палеолимнологического анализа реконструирована история оз. Имандра.

В 1978 г. на базе Отдела энергетики КФАН СССР была организована лаборатория охраны природы. Исследования велись по нескольким направлениям, то есть изучались главные компоненты природы, подвергающиеся воздействию хозяйственной деятельности человека, — воды внутренних водоемов, морей и подземные воды, воздушный бассейн, почвы и растительность. Итогом всех исследований стала разработка прогнозов состояния компонентов природы и окружающей среды отдельных районов и области в целом при их

народохозяйственном освоении, экологическая и экономическая оценка ущерба, наносимого народному хозяйству вследствие загрязнения (Комплексное изучение..., 1972; Комплексное изучение Йокостровской..., 1976).

1980-е годы

Работы велись по заданию Государственного комитета науки и техники и в соответствии с программой работ, разработанной головными учреждениями — Академией наук СССР, Лабораторией мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета, Институтом прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова.

Результатом масштабных работ стала комплексная оценка состояния флоры и фауны крупных водоемов Мурманской обл. На ее основе дана характеристика природных особенностей водоемов Кольского Севера, проведен анализ основных антропогенных факторов, определены тенденции изменений физико-химических параметров водной среды, выявлены основные направления в составе фито- и зоопланктона, зообентоса и рыбного населения, был дан прогноз дальнейших преобразований водных экосистем при существующих уровнях нагрузки и при увеличении нагрузки пропорционально росту численности населения, а также при условии прекращения загрязнения.

В публикациях за этот период содержатся обширные сведения об экосистеме водоема: о влиянии зарегулирования и лесосплава, сбросных подогретых вод Кольской АЭС, коммунально-бытовых сточных вод, о накоплении тяжелых металлов в донных отложениях и организмах зообентоса, а также материалы токсикологических исследований, наблюдения за некоторыми видами рыб (Крючков и др., 1985; Моисеенко, Яковлев, 1990).

1990-е годы

Ряд работ был посвящен выявлению факторов, влияющих на изменение качества поверхностных вод Кольского Севера, в том числе их закисления. Рассчитан суммарный индекс загрязнения вод при одновременном развитии процессов токсификации, эвтрофикации, изменении солевого режима, мутности. Для организации регионального ихтиологического мониторинга поверхностных вод была создана единая комплексная информационная система, объединяющая сведения, получаемые научными и контролирующими организациями. Тогда же была предложена схема патолого-морфологического исследования с балльной оценкой тяжести наблюдаемых изменений и дано описание основных патологий органов и тканей рыб. На основании более чем 10-летних исследований оз. Имандра были изложены особенности многолетней динамики сообществ зоопланктона и зообентоса, охарактеризован видовой состав, распределение и их количественное развитие, структурно-функциональные особенности фитопланктонного сообщества, продолжены ихтиологические исследования.

Выполнено атомно-абсорбционное определение различных форм нахождения тяжелых металлов в природных водах, которое необходимо, чтобы изучить их влияние на биоту, взаимодействие с донными отложениями и закономерностями распространения. По индексу риска Хокансона и результатам определения степени загрязнения донных отложений тяжелыми металлами была проведена классификация озер Кольского полуострова, в том числе оз. Имандра, и дана характеристика их экологического состояния.

По итогам исследований, проведенных в эти годы, были изданы сборники и монографии: «Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов» (1995); «Экологические проблемы Севера европейской территории России» (1996); «Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики» (1997); «Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра» (2002).

2000-е годы

С началом XXI в. особое внимание уделялось выявлению проблем биоиндикации антропогенных воздействий на пресноводные экосистемы Субарктики и долгосрочных трендов трансформации пресноводных экосистем. Использование опробированных методологических подходов оценки состояния биологических систем различного уровня организации для индикации загрязнения водоемов позволило сохранить преемственность в многолетних исследованиях оз. Имандра, а применение информационных технологий вывело экологические исследования на новый уровень.

Один из наиболее проработанных вопросов в функционировании экосистемы оз. Имандра — выявление закономерностей поведения тяжелых металлов в донных отложениях и их негативного влияния на гидробионты и экосистему озера в целом.

Картографирование экологического состояния водосбора оз. Имандра было проведено Московским государственным университетом и Лабораторией аэрокосмических методов (г. Москва). По космическим снимкам была создана карта растительности водосбора оз. Имандра, учитывающая разнообразие экосистем и степень их деградации вследствие промышленного повреждения (Шипигина, 2006).

2010 г. — настоящее время

Результаты исследований последнего десятилетия выявили ряд закономерностей в изменениях структурно-функциональной организации популяций гидробионтов оз. Имандра. В ихтиологических исследованиях стал применяться метод выявления зависимости темпов роста рыб от факторов окружающей среды и изменения ростовых характеристик на протяжении жизненного цикла. После длительного перерыва возобновлены исследования флоры и растительности макрофитов оз. Имандра. Получены данные о флористическом составе макрофитов, проведены геоботанические описания акватории Большой и Йокостровской Имандры. Рассмотрены долговременные изменения химического состава донных отложений озера.

Реализуемый Институтом комплексный подход к исследованию поверхностных вод позволяет получить объективное представление о процессах трансформации пресноводных экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов, что, в свою очередь, является научной основой нормирования техногенных нагрузок и прогноза развития природных комплексов. Не теряют актуальности наблюдения за объектом повышенной опасности для северо-западного региона страны — Кольской атомной станцией.

Итогом исследований стали монографии: «Экологическое состояние наземных и водных экосистем в районе Кольской АЭС» (2010); «Методы экологических исследований водоемов Арктики» (2019); «Современное состояние экосистем в районе Кольской АЭС, Мурманская область» (2020).

Литература

1. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра : монография / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, А. А. Лукин [и др.] ; ответственный редактор Т. И. Моисеенко. Москва : Наука, 2002. 487 с.
2. *Берг, Л.С.* Рыбы Кольского полуострова /Л. С. Берг, И. Ф. Правдин // Известия Всесоюз. Ин-та озерного и речного рыбн. хозяйства. Вып. 2. Ленинград, 1948. Т. XXVI. 267 с.
3. Большие озера Кольского полуострова / К. Г. Купецкая, И. И. Великорецкая, Б. Г. Зенус [и др.] ; Ин-т озероведения АН СССР. Ленинград : Наука, 1976. 349 с.
4. *Верещагин, Г. Ю.* К гидрохимии озера Имандра / Г. Ю. Верещагин // Исследование озер СССР. Вып. 1. Москва, 1932. С. 27–33.
5. *Зернов, М. С.* Научно-исследовательская деятельность Мурманской биологической станции АН СССР за период с 1939 по 1949 гг. / М. С. Зернов // Труды Мурманской биол. станции. Москва ; Ленинград, 1948. Т. 1. С. 33–38.
6. Комплексное изучение и охрана озера Имандра : отчет НИР / рук. Беляева Г. В. ; исполн.: Чижиков В. В., Воробьева Д. Г. [и др.] // [Фонды Кольского филиала АН СССР]. Апатиты, 1972. 339 с.
7. Комплексное изучение Йокостровской и Бабинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема : отчет НИР / рук. Чижиков В. В. ; исполн.: Воробьева Д. Г., Моисеенко Т. И. // [Фонды Кольского филиала АН СССР]. Апатиты, 1976. Т. 1. 269 с.
8. *Крючков, В. В.* Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья : монография / В. В. Крючков, Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Апатиты : КФАН СССР, 1985. 132 с.
9. *Кудрявцев, Н. В.* Кольский полуостров. Физико-географический очерк. (Описание поездки на Белое море и перехода пешком через перешеек Кольского полуострова 1880 г.) / Н. В. Кудрявцев // Труды Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей. Вып. 2. Санкт-Петербург, 1882. Т. XII. С. 233–267.
10. Материалы к изучению поверхностных вод Кольского полуострова [сб. 1.] // [Фонды КНЦ АН СССР]. Мурманск, 1940. 406 с.
11. Методы экологических исследований водоемов Арктики : монография / С. С. Сандимиров, Л. П. Кудрявцева, В. А. Даувальтер [и др.] ; Мурманский гос. техн. ун-т. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2019. 180 с.
12. *Моисеенко, Т. И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики / Т. И. Моисеенко. Апатиты : КНЦ РАН, 1997. 261 с.
13. *Моисеенко, Т. И.* Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера : монография / Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Ленинград : Наука, 1990. 220 с.
14. Озера различных ландшафтов Кольского полуострова : в 2 частях. Ч. II : Гидрохимия и гидробиология / ответственные редакторы В. Г. Драбкова, Т. Д. Слепухина. Ленинград : Наука, 1974. 235 с.
15. Отечественные физико-географы и путешественники : справочное издание / под редакцией Н. Н. Баранского. Москва : Учпедгиз, 1959. 783 с.
16. Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера / ответственные редакторы д-р биол.

наук Т. И. Моисеенко, канд. биол. наук В. А. Яковлев. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 194 с.

17. *Рихтер, Г. Д.* Очерк исследования района озера Имандра / Г. Д. Рихтер // Труды Мурманской биологической станции. Вып. 1. Мурманск, 1926. Т. 2. С. 32–68.

18. *Рихтер, Г. Д.* Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна / Г. Д. Рихтер. Ленинград : Гос. техн.-теорет. изд-во, 1934. 144 с.

19. Современное состояние экосистем в районе Кольской АЭС (Мурманская область) / под ред. В. А. Маслобоева, Е. А. Боровичёва, Н. Е. Королёвой. Апатиты : Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2020. 311 с.

20. *Токин, И. Б.* Старейшее научное учреждение русского Севера (к 100-летию Мурманской биологической станции) / И. Б. Токин, В. Б. Хасанкаев // Природа и хозяйство Севера. Вып. 9. Мурманск, 1981. С. 3–9.

21. *Шипигина, Е. А.* Картографирование экологического состояния территории водосбора озера Имандра / Е. А. Шипигина, Е. И. Голубева, О. В. Тутубалина // Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тян-Шанского) : сборник материалов Междунар. конф., 10–12 октября : 2006 г. : в 2 частях. Ч. 1 / Кольский науч. центр РАН. Апатиты, 2006. С. 214–215.

22. Экологические проблемы севера европейской территории России : тезисы докладов / под редакцией Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлева, В. А. Даувальтера : сборник материалов Всерос совещ. (Апатиты, 11–15 июня 1996 г.) / Кольский научный центр РАН. Апатиты, 1996. 179 с.

23. Экологическое состояние наземных и водных экосистем в районе Кольской АЭС : монография / В. А. Маслобоев, Т. Т. Горбачева, Г. А. Евдокимова [и др.] ; Кольский научный центр РАН. Апатиты, 2010. 227 с.

24. Эколого-географические проблемы Кольского Севера : сборник научных трудов / под редакцией Г. В. Калабина / Кольский научный центр РАН. Апатиты, 1999. 159 с.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка плана исследования, отбор проб и определение их состава являются основой изучения водных экосистем. С целью выявления особенностей гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик акватории оз. Имандра Институтом проблем промышленной экологии Севера в 2001–2021 гг. проводились комплексные исследования водоема. Район работ охватывал губу Молочную, участки подводящего и сбросного каналов Кольской АЭС, акваторию плеса Бабинская Имандра, западную (губа Зашеечная) и восточную части акватории плеса Йокостровская Имандра, а также южную часть акватории плеса Большая Имандра.

Как известно, в толще воды образуется сложная система горизонтальных и вертикальных течений, скорость и направление которых могут изменяться очень быстро вследствие изменения метеорологических факторов, колебаний уровня воды и времени года. Поэтому серию отбора проб на конкретном участке водоема в определенный промежуток времени завершали максимально быстро, за минимальный промежуток времени.

Качество воды изменяется не только по акватории и глубине, но и во времени на каждом горизонте отбора проб. Для получения надежного, качественного результата учитывались все возможные трудности и проблемы, связанные с отбором проб и следующими факторами, например: наличием нескольких источников загрязнения; значительным изменением уровней воды (до 1,63 м); сильным течением в проливах между плесами; наличием гидротехнических сооружений и большого количества островов (144 острова).

В 1978 г. было дано обоснование выделения участков для крупных озер (Моисеенко, Яковлев, 1990), которое отражало специфику их загрязнения различными стоками: на акватории оз. Имандра выделено 9 зон. Данными гидрохимических исследований 1986 г. была подтверждена достоверность отличия выделенных зон. Основными дискриминирующими элементами обозначенных зон являлись техногенно привнесенные: SO_4 , Na, K, Ni. Представленная система зонирования была положена также в основу обобщения материалов в 1992–1998 гг. (Антропогенные..., 2002), что позволило выявить территориальную оценку изменения показателей и связать их с источниками загрязнения. Основными дискриминирующими элементами являлись: SO_4 , Na, Ni, Al, Sr.

При обобщении материалов исследований 2011–2018 гг. нами было отмечено, что ситуация с районированием водоема резко изменилась. Границы отдельных зон оз. Имандра выражены уже не так четко, а значения отдельных химических элементов в некоторых из них выравнивались между собой, поэтому в данной работе мы использовали иной подход к районированию водоема. Разделение на зоны мы проводили по отдельно взятым химическим элементам, каждый из которых является специфичным для локальной части акватории оз. Имандра, причем он может быть как антропогенного происхождения, так и природного.

2.1. Гидрологические наблюдения

Гидрологические наблюдения включали в себя изучение динамики водных масс и температурного режима оз. Имандра. Промеры глубин проводились

согласно «Наставлению гидрометеорологическим постам и станциям» (РД 52.04.614-2000). Глубины измеряли с лодки водомерными тросами и с помощью эхолота HUMMINBIRD 450.

Для изучения сезонного характера распространения подогретых вод и вертикального распределения физических параметров (температура и растворенный кислород) по глубине измерения в поверхностном слое (0,1 м) выполняли на глубине 10 и 20 м, а также в придонном слое с помощью портативного экспедиционного прибора WTW ProfiLine Multi 197i. Наблюдения производились на открытой акватории губы Молочная на четырех гидрологических профилях, на 40 отдельных станциях и 9 гидрологических профилях в плесах Бабинская и Йокостровская Имандра (рис. 2.1). В губе Молочная для выявления сезонного характера распределения температуры и растворенного кислорода по глубине наблюдения производились на 4 гидрологических профилях через каждые 2 м.

2.2. Гидрохимические исследования

Гидрохимические исследования, как отмечалось выше, проводились в плесах Бабинская и Йокостровская Имандра (рис. 2.1). С поверхностного слоя, срединных и придонного слоев пробы воды отбирали двухлитровым пластиковым батометром. Пробы воды отбирались на трех, а при значительной глубине — с четырех горизонтов. Общее количество отобранных гидрохимических проб составило 479.

Работы по отбору и анализу проб воды и донных отложений, а также хранение, консервация и подготовка проб к анализам и их анализ выполнялись аккредитованным Центром коллективного пользования физико-химических методов анализа Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра (аттестат аккредитации № РОСС RU.00010517126) в соответствии с аттестованными методиками. ЦКП создан в 1992 г. на основании решения Ученого совета ИППЭС и оснащен уникальными приборами и оборудованием для проведения экологических исследований. Все приборы состоят на балансе Института.

Используемые методы анализа и пробоподготовки:

- 1) атомно-абсорбционная спектрофотометрия;
- 2) ионообменная хроматография;
- 3) жидкостная хроматография;
- 4) потенциометрия, фотометрия;
- 5) микроволновое разложение биологических образцов;
- 6) мембранное фракционирование природных вод по размерам частиц.

Используемые методы являются общепринятыми, прошедшими международную верификацию. Химические анализы содержания контролируемых поллютантов проводятся по методикам, утвержденным Роскомгидрометом и входящим в «Госреестр методик количественного химического анализа и оценки состояния объектов окружающей среды Министерства природных ресурсов РФ».

Перечень контролируемых показателей: цветность, растворенный кислород, рН, электропроводность, кальций, магний, натрий, калий, щелочность, гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды, нитраты, нитриты, аммоний-ион, общий азот, фосфаты, общий фосфор, органическое вещество, кремний, алюминий, железо, медь, никель, кобальт, цинк, марганец, стронций, свинец, хром, кадмий, молибден, мышьяк.

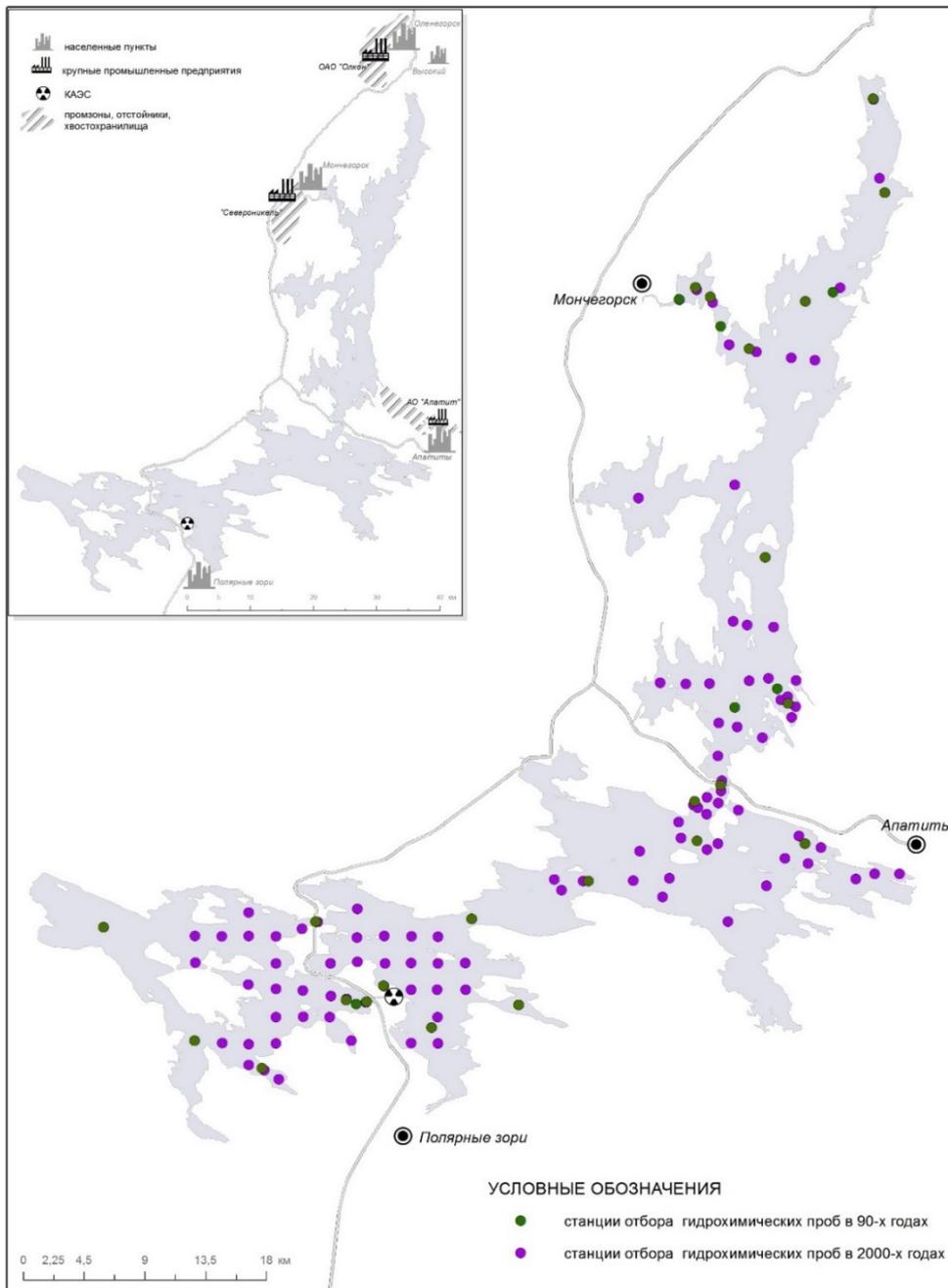


Рис. 2.1. Схема станций измерения физических параметров и отбора гидрохимических проб на оз. Имандра в 2011–2018 гг.

2.3. Исследования донных отложений

Для оценки современного экологического состояния оз. Имандра и изучения истории развития и загрязнения территории водосбора озера были исследованы донные отложения. 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 (Skogheim, 1979), позволяющему транспортировать колонки в лабораторию либо в полевой лагерь ненарушенными для дальнейшего использования. Колонки ДО были послойно разделены на слои по 1 см, помещены в предварительно помытую кислотой полиэтиленовую посуду и отправлены в лабораторию для анализа.

При написании монографии использовались материалы исследований ДО оз. Имандра за последнюю четверть века, когда после организации ИППЭС КНЦ РАН исследования ДО проводились по единой методике — с отбором колонок ДО и анализом их атомно-абсорбционными методами, что позволило четко разделить антропогенную и природную составляющие содержания элементов в отложениях озера. Материалы были разделены на исследования 1990-х и 2000-х. В 1990-е гг. основная часть результатов была получена во время съемки озера 1993 г., которые отражены в монографии (Антропогенные..., 2002), а в 2000-х гг. в основу положены съемки озера на акваториях влияния деятельности горно-металлургических предприятий и атомной энергетики — комбината «Североникель» (2007 г.), Оленегорского ГОКа (2010 г.), Кольской АЭС (2011 г., рис. 2.2) и АО «Апатит» (2012 г., рис. 2.3).

Использовались также результаты мониторинга на биостанции, единичные отборы колонок ДО на других станциях озера. Всего было отобрано и проанализировано около 60 колонок ДО для определения физических характеристик — влажности, потери при прокаливании и содержания элементов.



Рис. 2.2. Схема станций отбора проб ДО на оз. Имандра в зоне влияния Кольской АЭС

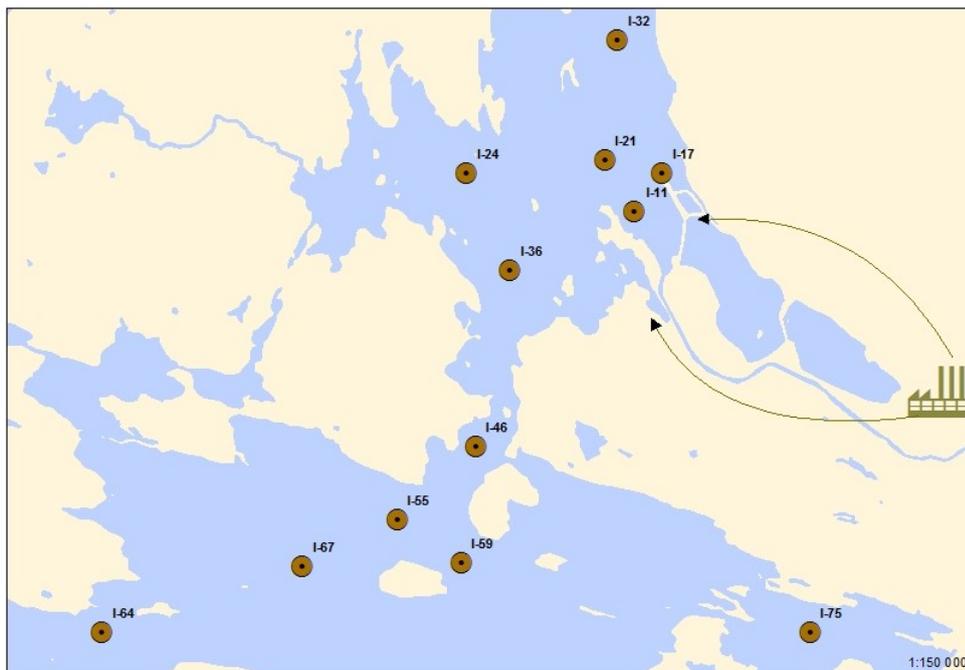


Рис. 2.3. Схема станций отбора проб ДО на оз Имандра в зоне влияния стоков АО «Апатит»

При выборе мест отбора колонок ДО основное внимание уделялось акваториям, куда непосредственно поступают сточные воды предприятий: комбинат «Североникель» — Монче-губа; Оленегорский ГОК — Куреньга-губа; АО «Апатит» — Белая губа и южная часть Большой Имандры; Африкандское рудоуправление — Зашеечная губа; Кольская АЭС — Молочная губа и восточная часть Бабинской Имандры. Акватория западной части Бабинской Имандры (губы Уполокша и Камка) рассматривалась как относительно незагрязненная, не подверженная непосредственному влиянию сточных вод, хотя водосбор этой части озера испытывает атмосферное загрязнение.

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 щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Mg, Sr), а также алюминия и фосфора проводились в лаборатории Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.

Образцы (примерно 5 г) были высушены в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 6 часов, затем определялась влажность образца (Häkanson, 1980). Чуть позже образцы прокаливались в муфельной печи при температуре 450–500 °С в течение 4 часов для определения потерь при прокаливании 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 кислоты (HNO₃) класса ОСЧ в автоклаве с тефлоновым вкладышем при температуре 140 °С в течение 4 часов. Содержимое автоклава потом

охлаждалось до комнатной температуры, и 2 мл аликвота перемещалась в 60 мл пластиковую бутылочку и разбавлялась 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 AAS-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); посредством атомной эмиссии в пламени пропан-воздух (Na, K). С помощью прибора AAN-800 (электротермическая атомизация) определяли концентрации Cd, Pb, As; с использованием проточно-инжекционной ртутной системы Perkin-Elmer FIMS 100 определяли концентрации Hg, а фотометрическим методом с помощью прибора КФК-3-01 «ЗОМЗ» — содержание Р. Концентрации микроэлементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Sr) выражены в микрограммах на грамм (мкг/г) сухого веса, 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.

Для оценки загрязнения оз. Имандра была выбрана методика Л. Хокансона (Håkanson, 1980). Интенсивность загрязнения токсичными элементами определялась по значению коэффициента загрязнения (C_f^i):

$$C_f^i = \frac{C_{0-1}^i}{C_n^i},$$

где C_{0-1}^i — содержание элементов (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, As; Hg) в поверхностном слое (0–1 см) ДО, отобранных на исследуемых станциях; C_n^i — фоновое содержание элемента в самых глубоких слоях колонки ДО (обычно между 20 и 30 см).

Обоснование вышеназванного спектра металлов для определения интенсивности загрязнения основано на приоритетности загрязнения и высокой токсичности этих элементов для гидробионтов.

Коэффициент загрязнения (C_f^i) подсчитывается для каждого отдельного элемента. Если $C_{0-1}^i > C_n^i$, то этот элемент определялся как загрязняющий, если $C_{0-1}^i < C_n^i$, тогда элемент не может характеризоваться как загрязнитель.

В этом подходе придерживались следующей классификации:

$C_f^i < 1$ — низкий коэффициент загрязнения (свидетельствует о низком загрязнении ДО изучаемым элементом);

$1 \leq C_f^i < 3$ — умеренный коэффициент загрязнения;

$3 \leq C_f^i < 6$ — значительный коэффициент загрязнения;

$C_f^i \geq 6$ — высокий коэффициент загрязнения.

Степень загрязнения определялась как сумма всех коэффициентов загрязнения (C_f^i) для данной станции:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i = \sum_{i=1}^n \frac{C_{0-1}^i}{C_n^i}.$$

Данный подход позволил определить коэффициент загрязнения (C_f^i), который характеризует загрязнение данной акватории отдельными элементами, а также их суммарный вклад на основе установления степени загрязнения C_d , которое определяет общее загрязнение бассейна исследуемыми веществами.

Аналогичным образом при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались классификации, предложенной Л. Хокансоном (Håkanson, 1980), из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по n элементам:

$C_d < n$ — низкая степень загрязнения;

$n \leq C_d < 2n$ — умеренная степень загрязнения;

$2n \leq C_d < 4n$ — значительная степень загрязнения;

$C_d \geq 4n$ — высокая степень загрязнения, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Для характеристики экологического состояния оз. Имандра данный подход наиболее приемлем и позволяет представить характер загрязнения адекватным и стандартным для всех исследованных станций способом на основе коэффициента и степени загрязнения, что было показано ранее в монографии (Антропогенные..., 2002).

Для оценки загрязнения токсичными веществами оз. Имандра были определены значения коэффициента загрязнения по 8 элементам (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, As, Hg), поэтому использовалась следующая классификация:

$C_d < 8$ — низкая степень загрязнения;

$8 \leq C_d < 16$ — умеренная степень загрязнения;

$16 \leq C_d < 32$ — значительная степень загрязнения;

$C_d \geq 32$ — высокая степень, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Литература

1. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра : монография / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, А. А. Лукин [и др.] ; ответственный редактор Т. И. Моисеенко. Москва : Наука, 2002. 487 с.
2. Моисеенко, Т. И. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера / Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Ленинград : Наука, 1990. 220 с.
3. РД 52.04.614-2000. Наставление гидрометеорологическим постам и станциям (от 29.03.2000).
4. Håkanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control — a sedimentological approach / L. Håkanson // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.
5. Skogheim, O. K. Rapport fra Arungenprosjektet / O. K. Skogheim. Oslo : As-NLH, 1979. Nr. 2. 7 p.

3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ БАССЕЙНА ОЗЕРА ИМАНДРА

Климатические ресурсы Мурманской обл. наиболее подробно представлены в ряде справочных изданий (Агроклиматический справочник..., 1961; Справочник по климату..., 1965; Агроклиматические..., 1971; Научно-прикладной..., 1988). Однако все они основаны на измерениях, выполненных, в лучшем случае, до 1980 г. Между тем последние десятилетия на территории области характеризуются значительным потеплением климата, в связи с чем правомерно возникает вопрос о корректности использования характеристик, рассчитанных по данным XIX и XX вв.

Для иллюстрации произошедших изменений в табл. 3.1 приведены климатические нормы на ГМС «Мончегорск» 1881–1960 (Справочник по климату..., 1965), 1961–1991 гг. и среднемесячные температуры воздуха в период 1991–2017 гг. Современные температуры выше как периода 1881–1960, так и периода 1961–1990 гг. Такая же картина наблюдается и в других районах Кольского полуострова. На практике это выражается, например, в регулярных положительных аномалиях в последние годы (рис. 3.1). Данный факт говорит о том, что термические характеристики района, приведенные в климатических справочниках, можно считать устаревшими.

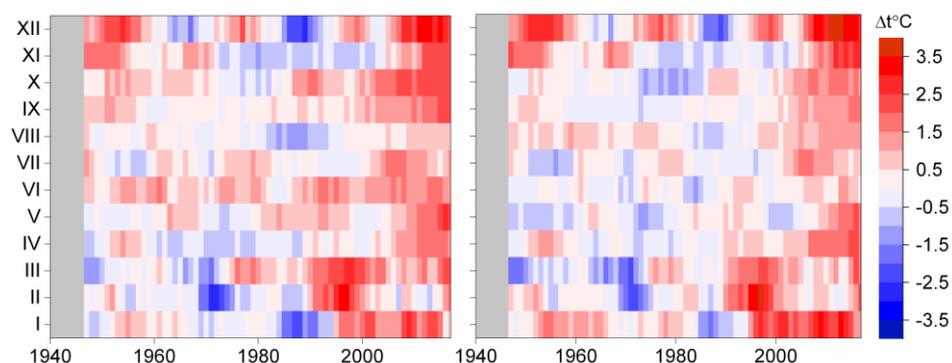


Рис. 3.1. Аномалии среднемесячных температур на ГМС «Мончегорск» от климатической нормы 1881–1960 гг. и 1961–1991 гг. после 10-летнего сглаживания

Таблица 3.1

Климатические нормы 1881–1960 и 1961–1990 гг.
и среднемесячная температура на ГМС «Мончегорск» в период 1991–2017 гг.

Месяц	1881–1960 гг.	1961–1990 гг.	1991–2017 гг.
I	–12,7	–13,3	–11,3
II	–12,4	–12,7	–11,2
III	–8,5	–8,0	–6,7
IV	–2,1	–2,4	–1,2
V	3,3	3,7	4,4
VI	9,4	10,2	10,6
VII	13,5	13,7	14,4

Месяц	1881–1960 гг.	1961–1990 гг.	1991–2017 гг.
VIII	11,8	11,3	12,3
IX	6,2	6,5	7,6
X	–0,1	0,5	1,5
XI	–6,0	–6,2	–5,0
XII	–10,4	–10,9	–8,5

3.1. Современные климатические нормы

В соответствии с Техническим регламентом Всемирной метеорологической организации климатологические стандартные нормы являются средними значениями климатологических данных, рассчитанных для последовательных 30-летних периодов: с 1 января 1901 г. по 31 декабря 1930 г., с 1 января 1931 г. по 31 декабря 1960 г. и т. д. В настоящее время действующей климатической нормой должен быть период 1961–1990 гг., а очередной переход к новым климатическим нормам (1991–2020 гг.) должен был бы состояться в 2021 г. Однако на фоне быстрого потепления климата, чтобы приблизить нормы к современным условиям, что важно при планировании хозяйственных решений, связанных с климатическими ресурсами, комиссия ВМО в 2015 г. приняла решение о ежедекадном обновлении норм большинства метеопараметров. Согласно этому предложению, современными нормами следует считать значения, рассчитанные за период 1981–2010 гг., в то время как значения 1961–1990 гг. остаются базовыми для оценок климатических изменений. Данное обстоятельство создает некоторую путаницу, так как теперь необходимо указывать, относительно какого периода рассматривается аномалия. Климатические нормы, рассчитанные таким образом, более адекватно описывают современное состояние климата. Однако частая (через каждые 10 лет) смена климатических норм требует пересмотра многих параметров, например, глобальная средняя поверхностная температура в период с 2017 по 2021 гг. (на основе данных ВМО) является одной из самых высоких за всю историю наблюдений и, по оценкам, на 1,06–1,26 °C выше доиндустриальных уровней (1850–1900 гг.). Причем в случае Кольского полуострова с высокой долей вероятности эти изменения произойдут также в сторону повышения: средние значения температуры в регионе, рассчитанные за 1991–2017 гг., во все месяцы теплее, чем по климатической норме 1981–2010 гг., на 0,2–1,4 °C.

В настоящее время в прибрежной зоне оз. Имандра расположены три ГМС Мурманского управления гидрометслужбы (Мончегорск, Апатиты, Зашеек). Среднемесячные значения температуры на выбранных ГМС для периода 1981–2010 гг. приведены в табл. 3.2. Данные подготовлены ВНИИ Гидрометеорологической информации — Мировой центр данных и являются официальными современными климатическими нормами температуры воздуха.

Озеро Имандра вытянуто с севера на юг более чем на 100 км, и можно предположить различие термических ресурсов, обусловленное широтным градиентом. Однако если считать, что ГМС «Мончегорск» и «Зашеек» характеризуют климат соответственно северной и южной части озера (расстояние между данными ГМС — 61 км), картина получается неоднозначной. Например,

средняя летняя температура в период 1981–2010 гг. на ГМС «Мончегорск» и «Зашеек» оказывается одинаковой (12,1 °С), в то время как время по климатической норме 1881–1960 гг. (Справочник по климату..., 1965) в Зашейке примерно на 0,2 °С теплее. Сравнение норм 1861–1960 и 1981–2010 гг. показывает, что на ГМС «Зашеек» относительно ГМС «Мончегорск» также незначительно похолодало зимой, летом и осенью и потеплело весной. Соотношение, приведенное в «Справочнике по климату СССР»(1965), могло измениться как из-за смены макроциркуляционных эпох (30-летнего периода недостаточно для установления устойчивого пространственного распределения температуры воздуха), так и в результате переноса метеорологических площадок в новые местоположения с другими микроклиматическими условиями (1984 г. — ГМС «Зашеек», 1990 г. — ГМС «Мончегорск»). Данный пример показывает, что без привлечения микроклиматической информации невозможно установить климатические различия.

Таблица 3.2

Климатическая норма 1981–2010 гг.

Месяц	Гидрометеостанции		
	Мончегорск	Апатиты	Зашеек
I	-11,9	-13,6	-12,6
II	-11,6	-13,1	-12,2
III	-7,2	-8,0	-7,2
IV	-1,5	-2,1	-1,5
V	4,1	4,0	4,3
VI	10,4	10,7	10,6
VII	14,1	14,0	14,0
VIII	11,7	11,3	11,6
IX	7,2	6,5	6,8
X	1,3	0,8	1,1
XI	-5,9	-6,4	-5,8
XII	-9,9	-11,1	-10,1

Искажающая роль микроклимата проявляется довольно заметно. Например, интенсивный турбулентный обмен в районе ГМС «Мончегорск», обусловленный орографическими особенностями окружающей территории, создает более высокие минимальные температуры воздуха (зимние или ночные летом), что в конечном счете отражается и на среднемесячных значениях. Метеорологическая площадка ГМС «Апатиты» (135 м н. у. м.) находится всего в 250 м от наименьшей отметки в районе (126,7 м — урез оз. Имандра), здесь происходит накопление холодного воздуха, стекающего с окружающих холмов, и температуры ниже.

Так как водосбор оз. Имандра включает и горные районы к западу и востоку от озера, то на рис. 3.2 приведено вертикальное распределение температуры воздуха, построенное с учетом наблюдений в Хибинах, проводимых центром лавинной безопасности АО «Апатит». Весной, летом и осенью

температура практически линейно уменьшается с высотой. Зимой до высот примерно 350–400 м устанавливается инверсионное распределение, а выше температура снова понижается. В первом приближении можно считать, что вертикальные профили температуры воздуха в горных районах западнее Имандры, где нет метеорологических наблюдений, примерно такие же, как и на рис. 3.2.

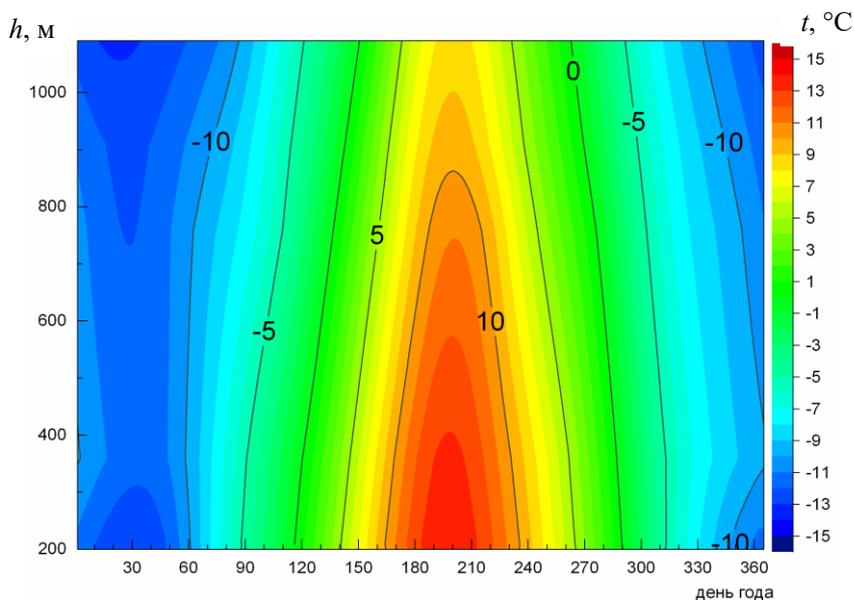


Рис. 3.2. Годовой ход температуры воздуха на разных высотах в Хибинах

Для многих задач только среднемесячной температуры недостаточно, необходимо знать ее значения для менее продолжительных периодов. Декадные показатели температуры воздуха для ГМС, расположенных на берегу Имандры, приведены в табл. 3.3. Они получены аналитическим методом — по годовому ходу температуры воздуха (табл. 3.2), сглаженному тригонометрической функцией вида:

$$t(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \sin i\omega x + b_i \cos i\omega x). \quad (5)$$

Необходимость получения сглаженного годового хода температуры обусловлена тем, что для расчета декадных, пентадных и среднесуточных температур традиционный метод осреднения наблюдений оказывается непригодным, так как для расчета декадных температур той же точности, что и среднемесячных, требуется ряд в 3–4 раза большей длины (Кобышева, Наровлянский, 1978). На практике годовой ход температуры, полученный за 30-летний период простым осреднением суточных данных, получается не плавным, а «зубчатым».

Пример годового хода температуры воздуха и его аналитического представления показан на рис. 3.3. Среднемесячные температуры воздуха по ГМС «Мончегорск», «Апатиты», «Зашеек», рассчитанные по годовому ходу, описанному с помощью тригонометрических рядов, не более чем на 0,1 °C отличаются от среднемесячных значений (см. табл. 3.2). Отсутствие единой

утвержденной методики допускает, что годовой ход температуры может быть описан иными способами, следовательно, возможны небольшие расхождения в расчетных значениях.

Таблица 3.3

Средняя декадная температура воздуха
для весеннего, летнего и осеннего сезонов

Месяц, декада	Гидрометеостанции			
	Мончегорск	Апатиты	Зашеек	
IV	1-я	-3,5	-4,2	-3,6
	2-я	-1,5	-2,1	-1,4
	3-я	0,4	0,0	0,6
V	1-я	2,3	1,9	2,4
	2-я	4,0	3,9	4,2
	3-я	6,0	6,1	6,2
VI	1-я	8,3	8,6	8,5
	2-я	10,5	10,8	10,7
	3-я	12,4	12,6	12,5
VII	1-я	13,9	13,9	13,8
	2-я	14,3	14,2	14,2
	3-я	14,0	13,8	13,9
VIII	1-я	13,0	12,7	13,0
	2-я	11,8	11,4	11,8
	3-я	10,4	9,9	10,3
IX	1-я	8,9	8,2	8,6
	2-я	7,3	6,5	6,9
	3-я	5,5	4,7	5,1
X	1-я	3,6	3,0	3,3
	2-я	1,4	0,9	1,3
	3-я	-1,0	-1,5	-1,2

Используя сглаженный годовой ход, можем получить также даты перехода температуры воздуха через 0, 5 и 10 °С (важнейшие биоклиматические характеристики термического режима), продолжительность периодов с температурой выше указанных пределов, а также суммы температур за эти периоды (табл. 3.4). Как видим, эти показатели в разных частях озера различаются незначительно.

Переход максимальной температуры через 0 °С в регионе наблюдается в первой пятидневке апреля; среднесуточной — в пятой пентаде апреля (ГМС «Мончегорск» и «Зашеек» — 23 апреля, «Апатиты» — 26 апреля). Минимальные суточные температуры переходят через 0 °С 12–15 мая, переход среднесуточных значений через 5 и 10 °С (так называемые эффективные и активные температуры) 20–21 мая и 13–14 июня соответственно.

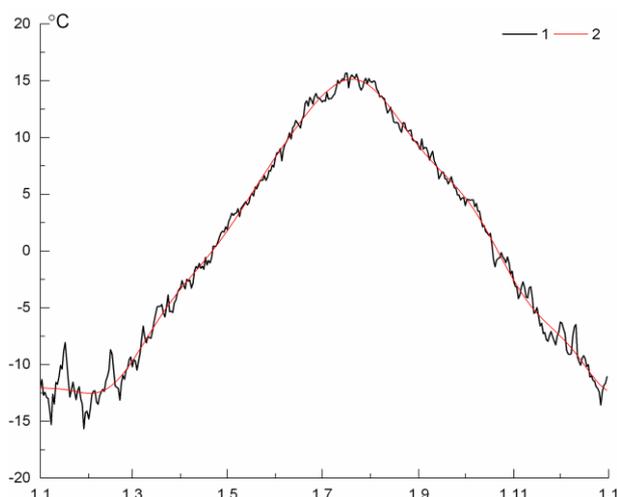


Рис. 3.3. Годовой ход температуры воздуха на ГМС «Кандалакша», полученный осреднением суточных данных (1) и сглаженный тригонометрическими функциями (2)

Обратный переход среднесуточных температур через 10 °С наблюдается в последней пятидневке августа, через 5 °С — в последней пятидневке сентября, а к отрицательным значениям — 19–21 октября, а с конца октября и максимальные суточные становятся отрицательными.

Сравнение изменений этих параметров по отношению к значениям, приведенным в справочных изданиях (Справочник по климату..., 1965), не проводилось, так как даты перехода через указанные пределы ранее устанавливались графическим путем по гистограммам годового хода среднемесячных температур (то есть был использован другой метод описания годового хода температуры).

Таблица 3.4

Даты перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5, 10 °С
и сумма температур за указанные периоды

ГМС	Весна			Осень			Сумма температур		
	0 °С	5 °С	10 °С	10 °С	5 °С	0 °С	> 0 °С	> 5 °С	> 10 °С
Мончегорск	23 IV	21 V	13 VI	28 VIII	28 IX	21 X	1509	1376	966
Апатиты	26 IV	21 V	12 VI	24 VIII	23 IX	19 X	1460	1325	927
Зашеек	23 IV	20 V	12 VI	27 VIII	26 IX	21 X	1501	1366	965

Если исходить из таких термических характеристик вегетационного периода, как температуры летних месяцев (табл. 3.2), продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 5 и 10 °С и сумма температур за указанные периоды (табл. 3.4), существенной разницы в теплообеспеченности вегетационного периода на севере Имандры и на ее южных берегах нет (по крайней мере, согласно месторасположению выбранных ГМС). Сумма температур выше 5 °С в Мончегорске — 1374 °С, в Зашейке — 1365 °С, а сумма температур выше 10 °С — 958 и 978 °С соответственно.

Представление о внутрисуточной изменчивости температуры воздуха в разные сезоны можно получить по годовому ходу среднесуточной максимальной и минимальной температуры (рис. 3.4). Летом максимальная температура, как правило, характерна для дневных часов, минимальная — для ночных, а в период ноябрь-март суточный ход практически не проявляется, время наступления максимума и минимума не привязано к определенным часам суток, а определяется синоптическими условиями.

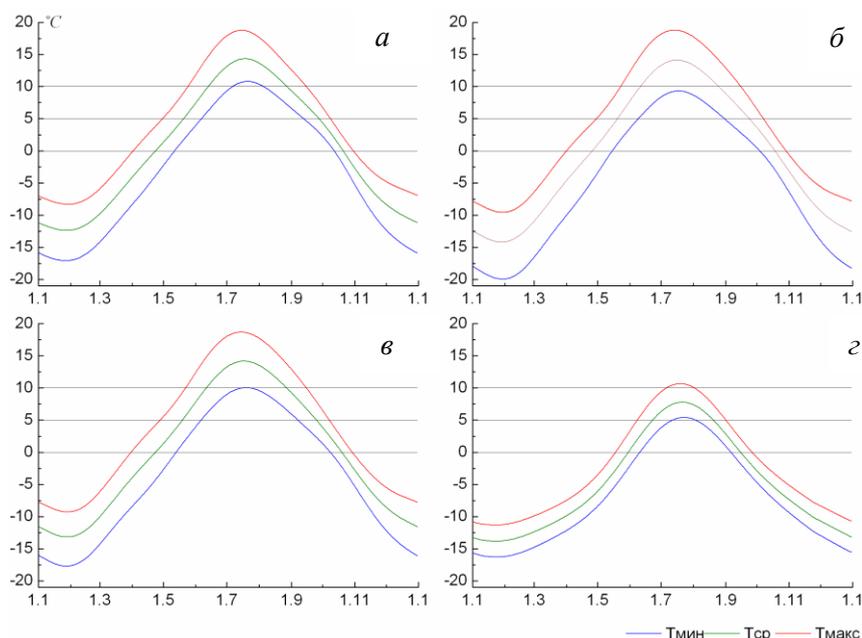


Рис. 3.4. Годовой ход среднесуточных средних, максимальных и минимальных температур на ГМС «Мончегорск» (а), «Апатиты» (б), «Зашеек» (в), г. Ловчорр (г), 1981–2010 гг.

При обсуждении климатических ресурсов территории нельзя обойти вниманием пространственную изменчивость температуры воздуха, которая на границах контрастных по микроклимату участков может на порядок превышать ее характерный широтный и высотный градиент. Даже на территориях со слабовсхолмленным рельефом (менее 50 м) в ясные тихие ночи верхние части склонов и вершины могут оказаться значительно теплее, чем прилегающая равнина, долины и замкнутые понижения.

Микроклиматические вариации температуры создаются не только различиями форм рельефа, но и особенностями подстилающей поверхности. В летний период основной фактор, обуславливающий микроклиматические различия отдельных участков, — неоднородности подстилающей поверхности (участки с разными типами растительности, физическими свойствами почвы, наличие болот, близость водоемов и т. д.) и формы рельефа. В холмистом рельефе с относительными превышениями до 100–150 м эффект высоты перекрывается влиянием неоднородностей подстилающей поверхности и форм рельефа (Микроклимат..., 1967; Мищенко, 1984). В зимний период, когда снежный покров сглаживает условия излучения, а водоемы замерзают, роль неоднородностей

подстилающей поверхности снижается и в наибольшей степени проявляется топография местности, определяющая условия радиационного выхолаживания, стока и притока холодного воздуха и площадь воздухообора. Микроклиматические различия наиболее заметно проявляются в ясную погоду при слабом ветре.

Из-за исключительного многообразия форм рельефа и различных ландшафтов в бассейне Имандры термические характеристики могут заметно изменяться на расстояниях даже сотен метров. В этой связи перенос данных ближайшей ГМС на районы, не охваченные метеорологическими наблюдениями, требует осторожности. Климатическое описание участка следует проводить с использованием ГМС с аналогичным набором процессов, формирующих микроклимат, либо пользоваться микроклиматическими поправками, приведенными в ряде специальных изданий (Микроклимат..., 1967; Мищенко, 1984).

Для иллюстрации в табл. 3.3 приведены значения микроклиматической изменчивости летних и зимних температур в холмистом и горном рельефе. В холмистом рельефе перепады температур, возникающие днем и ночью, неодинаковы по абсолютной величине. Днем, в притоке солнечной радиации на пологих склонах, они невелики, а при скоростях ветра 2–3 м/с в это время суток обеспечивается хорошее турбулентное перемешивание, которое сильно сглаживает поле температуры: даже при ясном небе различия, как правило, не превышают 0,5–1,5 °С. Наибольшие неоднородности возникают зимой, а ночью — во все сезоны, при ясном небе, когда охлажденный воздух, образовавшийся на выпуклых формах рельефа, как более тяжелый, стекает вниз по склону и скапливается в понижениях рельефа, образуя так называемые «озера холода». Такое перераспределение холодного воздуха приводит к сильным различиям минимальных температур даже на небольших участках.

Таблица 3.5

Изменение дневной и ночной температуры (ΔT_d и ΔT_n , °С) под влиянием местоположения в холмистом и горном рельефе, лето (Мищенко, 1984)

Мезорайон по базису эрозии (ΔH)		Вершина, верхняя часть склонов		Широкая долина		Замкнутая узкая долина, котловина		Вершина-котловина	
		1	2	1	2	1	2	1	2
Холмистый рельеф ЕТР (50–150 м)	ΔT_d	> -0,5	-0,5...-1	0,5	0,5...1	> 0,5	1	> 1	1,5...2
	ΔT_n	1...2	2	-1...-2	-2...-3	-2	-3	3...4	5
Низкогорный рельеф ЕТР (150–300 м)	ΔT_d	-0,5...-1	-1	> 0,5	0,5...1	0,5...1	0,5...1	1,5...2	2...2,5
	ΔT_n	2	2–3	-2	-3	-2...-3	-3...-4	4–5	5–7
Горный рельеф ЕТР (> 300 м)	ΔT_d	-1	-1...-1,5	0,5...1	1	> 1	> 1...1,5	2	2...3
	ΔT_n	2...3	> 3	-2...-3	-3...-4	-3	-4...-5	> 5	7...8

Примечание. Числа со знаком «-» и без него означают соответственно уменьшение и увеличение температуры воздуха по сравнению с открытым ровным местом.

Представленные в табл. 3.5 и 3.6 данные об изменении температур являются только средними. В реальных условиях в зависимости от погоды

температуры могут варьировать в значительном диапазоне. Так, например, в условиях холмистого рельефа центральной части Кольского полуострова разность температур между вершинами холмов и прилегающей равниной может достигать 10–18 °С на расстоянии всего в несколько километров при перепадах высот от 30 до 70 м (Демин и др., 2017).

Возникновению таких значительных разностей способствует небольшая инсоляция и полярная ночь: при установившейся антициклонической погоде с ясным небом и слабым ветром радиационное выхолаживание продолжается непрерывно на протяжении нескольких дней, способствуя значительному охлаждению воздуха. В летний период разности меньше по величине (до 6–8 °С) возникают только ночью, точнее в период с отрицательным радиационным балансом.

Таблица 3.6

Изменение минимальной температуры (°С) зимой в холмистом и горном рельефе

Мезорайон по базису эрозии	Вершина, верхняя треть склонов	Середина склонов	Широкая долина	Замкнутая долина, котловина	Разность вершина-котловина
Холмистый рельеф ЕТР (50–150 м)	3–4	> 2	–2...–3	–4...–5	7–9
Низко- и среднегорный рельеф ЕТР (150–300 м и более)	4–5	2–3	> –3	–5...–6	9–11

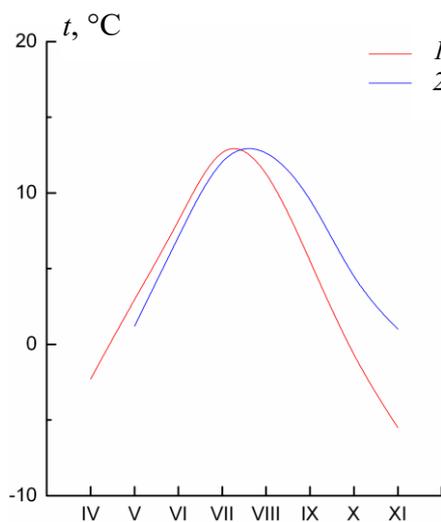


Рис. 3.5. Среднемесячная температура воздуха (1) и воды (2) у берега, «Зашеек»; построено по графику из (Ресурсы..., 1970)

В период таяния и замерзания, а также летом в прибрежной зоне и на островах температура воздуха может быть искажена термическим воздействием оз. Имандра. В период прогрева температура воды в озере ниже температуры натекающего на водную поверхность воздуха, с августа и до замерзания наблюдается обратная ситуация (рис. 3.5).

Таким образом, воздух над акваторией озера охлаждается весной и в начале лета и подогревается в конце лета и осенью. Очевидно, что представленными на рис. 3.5 соотношениями можно воспользоваться для оценки термических ресурсов водной акватории, береговой зоны и островов.

Вместе с тем термическое воздействие Имандры очень ограничено. Это подтверждается, например, сравнением температур воздуха на ГМС «Апатиты», находящейся примерно в 250 м от кромки озера, и на АМСГ «Апатиты», на удаленной от водоема более чем на 10 км. По результатам четырехлетних измерений в период с мая по октябрь показатели температуры воздуха в 15 часов практически не отличаются, хотя именно в это время должен был бы в наибольшей степени проявиться охлаждающий эффект озера (весной и в первую половину лета).

Полученный результат согласуется с известным фактом, что воздействие даже крупных водоемов интенсивно затухает на первых сотнях метров от берега и практически неуловимо на расстоянии 1,5–2,0 км (Микроклимат..., 1967; Мищенко, 1984).

Проверка отепляющего эффекта в рядах минимальной (ночной) температуры сопряжена с рядом сложностей. Ранее уже было отмечено, что минимальные (ночные) температуры весьма чувствительны к местоположению. Так как оз. Имандра занимает депрессию, отепляющий эффект на прибрежные участки суммируется с охлаждением, вызванным притоком холодного воздуха. По этой причине ночные температуры на АМСГ «Апатиты» несколько выше, чем на ГМС «Апатиты».

3.2. Долговременные изменения температуры воздуха и прогнозы до 2050-х годов

Изучение динамики экосистемы оз. Имандра, в том числе выявление воздействия на нее антропогенной деятельности, невозможно без привлечения информации о долговременных климатических изменениях. Выше было отмечено очевидное потепление климата в регионе, вместе с тем изменения температуры не всегда происходили с одинаковым знаком. Современное потепление наиболее выражено только в последние десятилетия, в том числе и потому, что на 1940–1960-е гг. пришлось кратковременное похолодание, наступившее после потепления начала XX века. Поэтому необходимо использовать данные о температуре воздуха в более ранние периоды.

Наиболее длинный и продолжающийся в настоящее время ряд наблюдений за температурой воздуха имеется на ГМС «Мончегорск» (с 1937 г.). Применяя методику восстановления температурных рядов по соседним станциям с длинными рядами (Семенов, 2008) и данные метеорологических наблюдений на севере Скандинавии (Klingbjer, Moberg, 2003; Andresen, 2011), температурный ряд по Мончегорску можем достаточно надежно продлить до 1803 г. Пример такой реконструкции среднесезонных и среднегодовых температур показан на рис. 3.6.

Динамика сезонных температур после сглаживания по 10, 20 и 30-летним периодам (скользящее среднее) представлена на рис. 3.7. Отложены прямые, соответствующие средним значениям последних 10, 20 и 30 лет. Такой способ наглядно демонстрирует наблюдающееся (и продолжающееся) потепление: средняя температура воздуха за последние 20–30 лет во все сезоны является самой высокой среди аналогичных периодов с 1802 г.

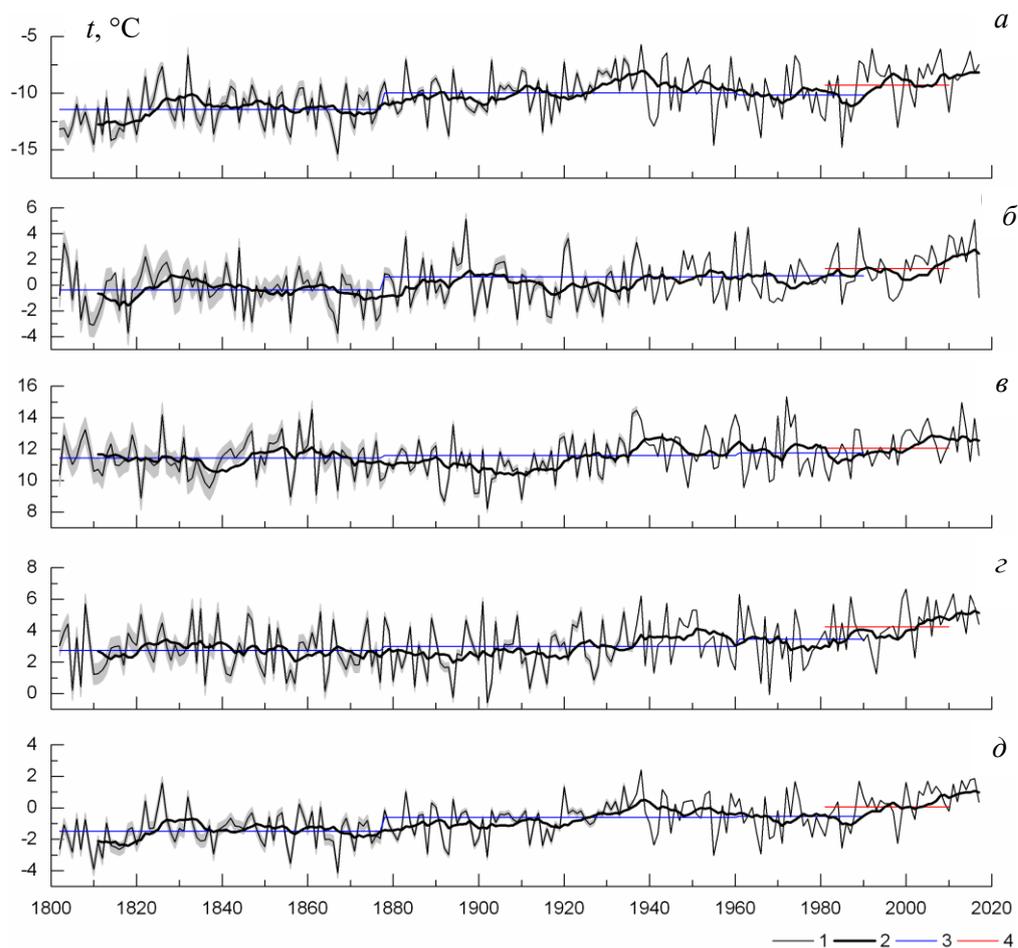


Рис. 3.6. Вариации средних сезонных и среднегодовой температуры в Мончегорске с 1802 по 2017 гг. и их сглаживание 10-летним фильтром: *а* — зима; *б* — весна; *в* — лето; *г* — осень, *д* — год. Серой заливкой отмечено среднеквадратичное отклонение приведенных данных. Горизонтальные линии соответствуют средним многолетним температурам для периодов 1802–1880, 1881–1960, 1961–1990 и 1981–2010 гг. (новая климатическая норма выделена красным цветом)

Представление о характере долговременных изменений температуры воздуха в регионе можно получить из рис. 3.1, где показана динамика сглаженных по десятилетиям аномалий температуры воздуха в период инструментальных измерений от ее среднего значения за 1961–1990 гг., и из рис. 3.8, в котором приведены сглаженные по десятилетиям аномалии сезонных температур (восстановленных и наблюдаемых) с 1802 по 2017 гг.

1. Современное потепление в регионе наиболее выражено с 1990-х гг. и продолжается в настоящее время.

2. Изменения температуры не имеют постоянного знака: периоды потепления сменяются периодами похолодания.

3. Измерения температуры в разных сезонах или среди соседних месяцев одного и того ж сезона могут происходить с разными знаками.

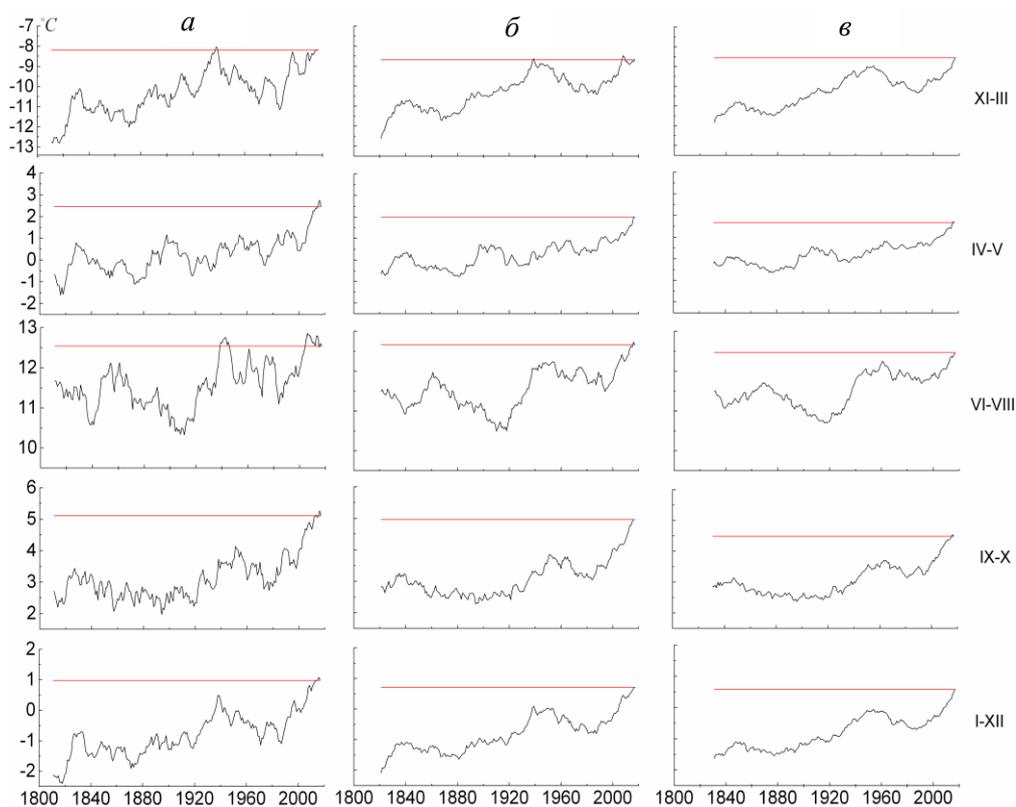


Рис. 3.7. Вариации средних сезонных (XI–III — зима, IV–V — весна, VI–VIII — лето, IX–X — осень) и годовых (I–XII) температур в Мурманске после 10-летнего (*а*), 20-летнего (*б*) и 30-летнего (*в*) сглаживания. Горизонтальная красная линия соответствует средней температуре сезона или года за последнее 10-, 20-, 30-летие (2007–2017, 1997–2017, 1987–2017). Выделение сезонов согласно (Яковлев, 1961)

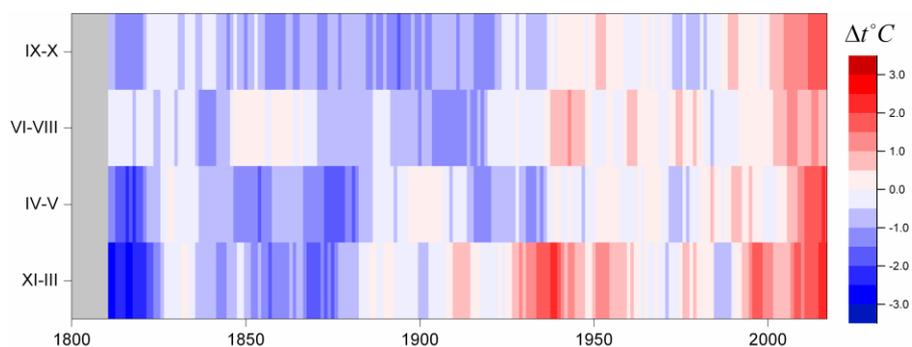


Рис. 3.8. Аномалии сезонных температур на ГМС «Мончегорск» от климатической нормы 1961–1990 гг. после 10-летнего сглаживания

Неоднозначный характер вариаций, видимо, создается изменениями в макроциркуляционном режиме атмосферы (сменами циркуляционных эпох), которые сопровождаются возникновением бóльших по величине аномалий

температуры, чем аномалии, создаваемые глобальными процессами, усиливая или ослабляя последние, что и отражается в сочетании периодов потепления и похолодания.

Несмотря на ряд работ, где демонстрируется пространственная неоднородность современного потепления на Кольском полуострове [см., например: (Семенов, 2008; Marshall et al., 2016)], проверка показывает, что ни в одном из сезонов нет статистически значимого различия в углах наклона линейных регрессий, описывающих тренд температуры на Кольском полуострове (Демин, 2015). Это позволяет говорить о примерной одинаковой скорости современного потепления, причем изменение температуры в горных районах Хибин, на уровнях 925 и 850 ГПа в свободной атмосфере (т. е. до высот примерно 1200 м), происходит с теми же скоростями, что и предгорной равнине (Демин, Волков, 2017).

Климатические модели и сценарии предполагают дальнейшее потепление в регионе. В наибольшей степени оно проявится в зимнее время, в наименьшей — в летнее, при этом произойдет существенное изменение границ сезонов.

Для пятого доклада об оценке МГЭИК научное сообщество определило набор из четырех новых сценариев, именуемых репрезентативными траекториями концентраций. Они определяются приближительной суммарной величиной радиационного воздействия в 2100 г. по сравнению с 1750 г.: 2,6 Вт/м² для РТК2.6; 4,5 Вт/м² для РТК4.5; 6,0 Вт/м² для РТК6.0; 8,5 Вт/м² для РТК8.5.

Согласно ансамблю из 31-й модели, средняя зимняя температура к период 2041–2060 гг. в регионе увеличится на 2,8 °С для сценариев РТК 2.6 и на 5 °С для сценария РТК8.5. По прогнозу для указанных крайних сценариев, весенняя температура повысится на 2,5 и 3,6 °С, летняя — на 2 и 3,5 °С, осенняя — на 2,5 и 3,5 °С соответственно.

Эти цифры кажутся действительно большими, однако не представляются абсолютно невозможными. Так, например, в период климатического оптимума голоцена январская температура в регионе была выше современной приблизительно на 3 °С, июльская — на 3–4 °С (14–16 °С) (Климаты и ландшафты..., 2010). В период максимума суббореального потепления (3500 лет назад) июль был теплее современного на 2 °С, а в период малого климатического оптимума (1000 лет назад) январь на севере был теплее на 1,5–2 °С выше, июль — на 2 °С.

3.3. Атмосферные осадки

Среднемесячные суммы осадков (климатические нормы 1981–2010 гг.) на ряде станций, расположенных в бассейне Имандры, приведены в табл. 3.7 (данные ВНИИ ГМИ — МЦД). Так как на гидрологический режим озера оказывают влияние ближайшие горные массивы, добавлены также значения суммы осадков на плато Ловчорр, являющемся одним из самых высоких в Хибинах (метеорологическая площадка — 1091 м, максимальная высота — 1200 м н. у. м.).

Среднегодовое количество осадков на предгорной территории около 500 мм, внутри Хибинского массива оно достигает 900 мм, на вершинах — до 1400 мм. Таким образом, от 400 до 900 мм осадков в Хибинах возникают вследствие мезомасштабных орографических процессов. Орографические осадки в горах формируются главным образом за счет интенсификации в Хибинах уже существующих зон осадков. Это вызвано тем, что вертикальные и горизонтальные

размеры Хибин (и прилегающих к Имандре другим горным массивам) не способствуют блокированию воздушных масс и формированию регионального циклогенеза, что имеет место в более крупных горных системах, и могут лишь обострить атмосферные фронты, например, за счет усиления вертикальной скорости при натекании воздуха на препятствие.

Таблица 3.7

Среднемесячные значения суммы осадков, мм

Станция	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Мончегорск	31	24	26	24	35	52	82	60	50	42	34	30
Апатиты	36	30	32	25	36	48	75	57	56	57	43	38
Зашеек	34	27	29	26	40	50	73	56	53	50	38	34
Ловчорр	85	65	85	77	81	92	136	140	164	156	111	90

На равнинах в центре Кольского полуострова максимум осадков наблюдается в летнее время. В этот период года влагосодержание воздуха, лимитирующее количество выпадающих осадков, достигает максимальных значений. В горах максимум сдвигается на осень, вызван он интенсификацией зон осадков при прохождении атмосферных фронтов (в этот период можно наблюдать активную циклоническую деятельность при еще достаточно большом влагосодержании атмосферного воздуха).

Несмотря на то, что максимум осадков приходится на летнее и осеннее время, наиболее часто они наблюдаются в зимнее время. Их меньшая продолжительность выпадения в летнее время компенсируется их более высокой интенсивностью (примерно в 3 раза выше). Число дней с жидкими осадками в Хибинах с высотой уменьшается, а количество дней с твердыми осадками возрастает. Смешанные осадки в долинах имеют место, как правило, в переходные сезоны, а на вершинах — в весенне-летнее. Снег в Хибинах вероятен даже в самом теплом месяце (июль), причем в горах возможно даже установление временного снежного покрова. При температурах ниже 5–6 °С выпадение снега возможно и на высотах 400–500 м, а при температуре ниже 3 °С эта вероятность достигает уже 50 %.

Снежный покров. Его образование в равнинной части в центре Кольского полуострова начинается, как правило, во второй декаде октября, а в горах — из-за более низких температур — много раньше. Средняя многолетняя дата появления временного снежного покрова на плато Ловчорр (Хибин, 1091 м) — 7 сентября, а с середины третьей декады можно ожидать уже устойчивого залегания (средняя многолетняя дата 26 сентября). Так как плато Ловчорр является одним из самых высоких, то эти даты можно принять за начало формирования снежного покрова в горных районах, окружающих Имандру. В холодные годы (при аномалиях температуры менее –2 °С) устойчивый снежный покров в Хибинах может появиться уже в начале сентября, в отдельные годы установление затягивается до третьей декады октября. В горных долинах Хибин временный снежный покров появляется в среднем в последние дни сентября,

а устойчивый — в середине октября. На равнинах, окружающих Иmandру, временный снежный покров устанавливается в середине октября, а устойчивый в начале ноября.

С момента возникновения устойчивого снежного покрова его высота возрастает и достигает максимальных значений в третьей декаде марта. Толщина снежного покрова имеет выраженный неравномерный характер в зависимости от ветрового режима, рельефа, характера растительности, например, с горных склонов зимой сдувается от 40 до 70 % выпавшего снега. На хорошо продуваемых и лишенных растительности гребнях можно встретить участки, практически лишенные снежного покрова, в то же время в понижениях рельефа, где происходит аккумуляция метелевого снега, толщина покрова может достигать нескольких метров (от 3–5 до 10–12 м).

На открытых пространствах большое количество снега сдувается ветром, в поле высота снежного покрова — 50–70 см, на продуваемой поверхности Иmandры — 35–50 см, в защищенных от ветра заливах — до 1 м. Большое количество снега накапливается также в лесной зоне, где в конце зимы его высота достигает 80–120 см.

Разрушение устойчивого снежного покрова наблюдается в конце первой декады мая, а его полный сход — 20–25 мая. На высоких плато разрушение устойчивого снежного покрова, как правило, затягивается до середины июня, а отдельные пятна сохраняются почти до июля. Даты схода снежного покрова в горных долинах и котловинах зависят от мощности снежных отложений, а также от степени защищенности долины от солнечных лучей: в защищенных снежники сохраняются в том числе и в течение всего лета.

Обращает на себя внимания очень большое отклонение дат установления и схода снежного покрова от средних многолетних значений: более двух недель в дате установления (временного и постоянного) и 10–12 дней в датах схода.

Оценка долговременных изменений осадков является непростой задачей. Более или менее однородные массивы данных по осадкам имеются только с 1966 г. Они содержат суммы осадков вместе с поправками на смачивание, введенными наблюдателем на станции. Все данные до 1966 г. требуют корректировки.

Вместе с тем нельзя сказать, что проблема регистрации осадков решена. Вследствие локальной деформации поля ветра, вызванной обтеканием осадкомерной установки, часть капель дождя или снежинок не попадает в приемное отверстие. Многочисленные исследования на экспериментальных полигонах показывают, что стандартный для метеорологической сети России и ряда других стран осадкомер Третьякова при скоростях ветра на уровне приемного отверстия 3, 5 и 7 м/с улавливает в среднем 70, 50 и 35 % общего количества твердых осадков (Кузьмин, 1960). Подобная проблема и у осадкомеров других конструкций. Такие большие погрешности при измерении осадков ставят вопрос о правомерности использования данных прямых измерений в климатических задачах. Неопределенность в оценках реального количества, обусловленного ненадежностью их измерения и неоднозначностью коррекции, вынуждает быть осторожными в оценках их долговременных изменений. Например, уменьшение скорости ветра всего на 1 м/с улучшит улавливание осадков примерно на 10 %, даже если их реальное физическое количество осталось неизменным. Аналогично к лучшей улавливаемости твердых осадков ведет и повышение температуры воздуха.

Действительное количество осадков можно представить следующим образом:

$$P = K(P_0 + \Delta P - P_f),$$

где K — коэффициент, учитывающий влияние аэродинамических факторов на измерение осадков; P_0 — количество измеренных осадков; ΔP — поправка на испарение осадков, конденсацию и смачивание; P_f — поправка, учитывающая количество ложных осадков, попавших в осадкомер за время метели.

В Арктике и других регионах, где значительная часть осадков выпадает в твердом виде, особенно при сильных ветрах и метелях, осадки, измеренные осадкомерами, не отражают их реального физического значения.

В последние годы предложены методы полной коррекции, однако единой и общепризнанной методики такой коррекции нет. В результате этого в разных климатических центрах созданы массивы данных, которые заметно различаются между собой, как следствие, появляются тренды, имеющие большие отличия по величине и даже знаку.

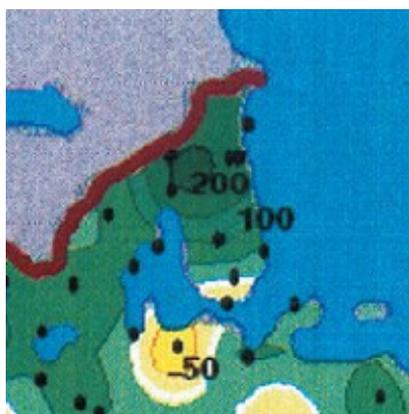


Рис. 3.9. Временные изменения (за 75 лет) количества осадков (мм) на территории России в период с 1936 по 2010 гг. по массиву ГТО (Второй оценочный..., 2014).

Примечание: отмечены станции, по которым построена карта

Для Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014) был использован массив осадков Главной геофизической обсерватории, полученный на основании срочных данных с учетом искажающего влияния, в том числе основного — аэродинамического. Изменение годовой суммы осадков в центре Кольского полуострова в бассейне Иmandры в 1936–2014 гг. составило более 150–200 мм (рис. 3.9).

Дальнейшее увеличение осадков в регионе прогнозируется климатическими моделями, но прогноз осадков современными моделями менее достоверен, чем температуры.

Неопределенность в оценке будущих значений осадков усиливается, особенно если учесть, что даже в современных измеренных суммах осадков имеются расхождения, сопоставимые с ожидаемыми изменениями в модельных расчетах.

3.4. Влажность воздуха

Территория Кольского полуострова находится в благоприятных по увлажнению условиях. Это вызвано вторжениями морских воздушных масс, притоком влаги с окружающих морей, испарением с водных поверхностей многочисленных озер, болот летом и осенью. В течение зимнего сезона при низкой температуре упругость водяного пара меняется мало. После схода снежного покрова быстрый рост температуры подстилающей поверхности и воздуха приводит к увеличению парциального давления. Годовой ход парциального давления фактически повторяет годовой ход температуры воздуха:

самое низкое влагосодержание воздуха отмечается в январе-феврале, самое высокое — в июне-августе. С высотой парциальное давление водяного пара убывает. Обычно это убывание описывается степенной или экспоненциальной зависимостью.

Несмотря на то, что абсолютное влагосодержание воздуха в зимние месяцы наименьшее, из-за низких температур давление насыщенного водяного пара также небольшое и воздух более близок к состоянию насыщения. Летом, даже при высоком влагосодержании, дефицит влаги более далек от величины насыщения. По этой причине годовой ход относительной влажности имеет максимум в холодное время года и минимум в летнее. Надо отметить, что для исследуемой территории нехарактерны большие различия в относительной влажности. Даже разница между ее значениями в районах, расположенных на морских побережьях, и центральными районами составляет всего несколько процентов.

В зимние месяцы суточные вариации парциального давления водяного пара отсутствуют. Весной и осенью они фактически повторяют дневной ход температуры, так как температура определяет интенсивность испарения с подстилающей поверхности. В летние месяцы в теплую погоду росту парциального давления, который начинается утром, в дневные часы препятствует конвективное перемешивание, из-за которого водяной пар выносится из приземного слоя. Наступает дневной минимум. Вечером, когда конвекция гаснет, температура поверхности еще высокая и испарение вновь увеличивает влагосодержание воздуха. Второй минимум наступает в ночное время. Амплитуда суточного хода небольшая (из-за слабости конвекции).

Суточные вариации относительной влажности фактически противоположны вариациям температуры воздуха: максимум относительной влажности наступает в предрассветное время, а минимум — в послеполуденное лето (20–30 %). В зимнее время суточный ход относительной влажности отсутствует.

Влагосодержание воздуха при его натекании на водную поверхность, как правило, увеличивается, но дополнительное увлажнение над Имандрой невелико и не обнаруживается при сравнении данных, полученных на метеорологических станциях у берега и вдали от него. Это обусловлено небольшой разницей температуры воды и воздуха в летнее время, а также малым временем пребывания воздушной массы над водной поверхностью.

3.5. Ветер

Самые высокие значения барических градиентов в регионе наблюдаются в холодное время года. Этому периоду соответствуют и наиболее высокие скорости ветра в свободной атмосфере. Зимний максимум скорости ветра отмечается и на горных вершинах. Из-за доминирующего в соответствии с общей циркуляцией атмосферы западного переноса на высотах здесь преобладают ветры северных, северо-западных, западных и юго-западных направлений и менее вероятны ветры восточных и юго-восточных направлений. Тормозящее действие горного массива проявляется в меньшей скорости ветра, чем на той же высоте в свободной атмосфере.

Годовой ход скорости ветра в приземном слое создается не только за счет барического градиента, но и за счет характера турбулентного обмена. Практически для всех районов в центре Кольского полуострова характерен годовой ход

скорости ветра с двумя небольшими максимумами (весной и осенью) и двумя минимумами (зимой и летом). Зимой стратификация пограничного слоя атмосферы устойчивая (инверсия), и обмен количеством движения по вертикали сильно ослаблен. Наблюдается сильное возрастание ветра с высотой, в то время как скорости ветра в приземном слое остаются небольшими. Летом турбулентный обмен усиливается, но в это время градиенты давления и скорости ветра в тропосфере снижаются, и увеличения скорости ветра в приземном слое не происходит. Весенний и осенний максимумы создаются за счет разрушения в дневные часы приземной инверсии и усиления турбулентного обмена на фоне повышенных барических градиентов. Типичный суточный ход ветра с минимумом в ночные часы и максимумом в дневные также создается вариациями турбулентного обмена.

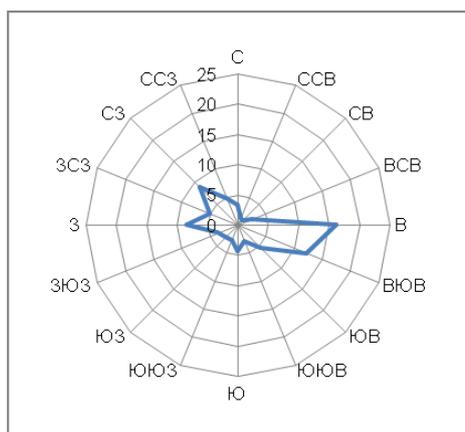


Рис. 3.10. Повторяемость различных направлений ветра на станции «Апатиты»

В действительности поле ветра в регионе из-за сложного рельефа сильно неоднородное, так как скорость и направление ветра в значительной степени зависят от местной орографии (рис. 3.10). Причем наибольшие различия проявляются при небольших (3–5 м/с) скоростях ветра, при сильном ветре разности почти нивелируются.

Скорость ветра над обширными водными объектами отличается от скорости ветра над окружающей сушей, так как меньшая шероховатость водной поверхности способствует усилению ветра. В среднем скорость ветра над крупными озерами на 15–20 % выше, чем над окружающей

сушей. Степень усиления ветра над водной акваторией зависит от метеоусловий и характера турбулентного обмена. Весной и в первой половине лета — в период прогрева водной массы — вода обычно холоднее воздуха. Проходящий над водой воздух охлаждается снизу, усиливает свою устойчивость, и скорость ветра при переходе с суши изменится незначительно. Осенью вода теплее воздуха. В этот период усиление ветра над водой должно быть заметнее.

Характерной особенностью крупных водоемов является бризовая циркуляция. Она прослеживается на Терском берегу, однако вопрос о ее проявлении на берегах оз. Имандра в настоящее время не исследован. В целом, возникновению бризов на Кольском полуострове препятствует не заходящее в летний сезон солнце, вследствие чего не наблюдается суточной смены знака разности температур суша-водоем.

3.6. Облачность. Продолжительность солнечного сияния

Годовой ход облачности характеризуется максимумом в осеннее время и минимумом в конце зимы и начале весны. Осенний максимум возникает за счет фронтальной облачности и соответствует времени активной циклонической активности. В период ее снижения количество облачности уменьшается. Этому

же способствует и уменьшение дневной облачности в связи с разрушением инверсий в дневные часы из-за усиления притока солнечной радиации.

С мая и далее летом, несмотря на более высокую повторяемость в это время антициклонических процессов, нижние слои воздуха активно прогреваются, что приводит к формированию кучевой облачности. Растекание этой облачности в ночные часы приводит к появлению слоисто-кучевых облаков, что также увеличивает количество облачности в целом. Из-за полярного дня в июне-июле количество облаков даже немного снижается. Годовые вариации числа ясных и числа пасмурных дней находятся в хорошей согласованности с годовым ходом облачности.

В летнее время, когда доминируют облака вертикального развития (кучевые и кучево-дождевые), максимум облачности наблюдается днем. В конце зимы, весной и осенью из-за возникновения в ночное время инверсии и формирования под ней облачности (слоистые формы облаков) максимум облачности приходится на утренние часы. Безусловно, что в конкретный день суточный ход может быть нарушен прохождением систем фронтальной облачности. В зимнее время суточный ход облачности не проявляется.

Средняя высота слоистых облаков в регионе около 400 м, слоисто-кучевых — 800–900 м, кучевых — 900 м. Как следствие, зимой вершины Хибин в 30–50 % всего времени находятся внутри облачных слоев. Летом, когда облачность формируется в значительной части за счет кучевых облаков, которая не затягивает небо сплошным покровом, это время сокращается (20–35 %).

Так как Имандра представляет довольно крупный по площади водный объект, то она должно оказывать воздействие на распределении облачности в теплое время года. Считается, что более холодная температура воды препятствует развитию тепловой конвекции, вследствие чего над акваторией озера снижается количество внутримассовой кучевой облачности.

Литература

1. Агроклиматические ресурсы Мурманской области : справочник. Ленинград : Гидрометеорол. изд-во, 1971. 89 с.
2. Агроклиматический справочник по Мурманской области. Ленинград : Гидрометеоздат, 1961. 87 с.
3. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на европейской территории России / В. А. Лобанов, Е. Л. Жильцова, Н. А. Лемешко [и др.] // Метеорология и гидрология. 2005. № 2. С. 5–14.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации : [общее резюме]. Москва : Росгидромет : Планета, 2014. 61 с.
5. Демин, В. И. Оценка пространственной неоднородности климата на Кольском полуострове / В. И. Демин // Математические исследования в естественных науках. Апатиты, 2015. С. 33–38.
6. Демин В. И. Сравнение скоростей потепления в Хибинах и на окружающей предгорной равнине / В. И. Демин, А. В. Волков // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 3. С. 16–27.
7. Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Москва : ГЕОС, 2010. 220 с.

8. *Кобышева, Н. В.* Климатологическая обработка метеорологической информации / Н. В. Кобышева, Г. Я. Наровлянский. Ленинград : Гидрометеиздат, 1978. 296 с.
9. *Кузьмин, П. П.* Формирование снежного покрова и методы определения снеготолщин / П. П. Кузьмин. Ленинград : Гидрометеиздат, 1960. 271 с.
10. Микроклиматическая изменчивость температуры воздуха в холмистом рельефе на Кольском полуострове / В. И. Демин, Б. В. Козелов, Н. И. Елизарова, Ю. В. Меньшов // Proceedings of the 40th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” (13–17 March 2017) / Кольский научный центр РАН. Апатиты : КНЦ РАН, 2017. С. 135–138.
11. Микроклимат СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1967. 286 с.
12. *Мищенко, З. А.* Биоклимат дня и ночи / З. А. Мищенко. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Вып. 2: Мурманская область. Ленинград : Гидрометиздат, 1988. 315 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР : в 20 томах. Т. 1: Кольский полуостров / под редакцией Ю. А. Елшина, В. В. Куприянова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 316 с.
15. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию. Санкт-Петербург : ГГО, 2008. 336 с.
16. *Семенов, А. В.* Инструментальные климатические наблюдения на Кольском полуострове и особенности обслуживания региональных потребителей климатической информацией / А. В. Семенов // Адаптация к изменению климата и ее роль в обеспечении устойчивого развития регионов : сборник материалов междунар. конф. (Мурманск, 13 мая 2008 г.). URL: <http://www.myshared.ru/slide/378692> (дата обращения: 11.04.2020).
17. Справочник по климату СССР : в 34 выпусках. Вып. 2. Мурманская область. Ч. II. Температура воздуха и почвы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. 144 с.
18. *Яковлев, Б. А.* Климат Мурманской области / Б. А. Яковлев. Мурманск : Кн. изд-во, 1961. 180 с.
19. *Andresen, L.* Homogenization of monthly long-term temperature series of mainland Norway. Met. no. Note 2, 2011. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway. Available at: http://met.no/filestore/Homog_Norway.pdf (accessed 21.03.2022).
20. *Klingbjer, P.* A composite monthly temperature record from Tornedalen in Northern Sweden, 1802–2002 / Per Klingbjer, Anders Moberg // Int. J. Climatology. 2003. No. 23. P. 1465–1494.
21. *Marshall, G. J.* Climate change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the last 50 years from meteorological observations / Gareth J. Marshall, Rebecca M. Vignols, W. G. Rees // J. Climate. 2016. No. 29. P. 6823–6840. DOI:10.1175/JCLI-D-16-0179.1.

4. АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА

Антропогенные факторы, которые в последние годы по значимости становятся сопоставимыми с природными, влияют на химический состав вод как в результате непосредственного сброса сточных вод и неорганизованных стоков, так и вследствие глобальных изменений окружающей среды и климата. Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение на пути основных транспортных магистралей привели к развитию мощного индустриального комплекса на территории водосбора оз. Имандра, что, в свою очередь, создало высокую антропогенную нагрузку на водоем. Среди основных производств выделяются следующие: горнодобывающая промышленность (АО «Апатит»); металлургическая промышленность (цветная металлургия — ОАО «Североникель», черная металлургия — ОАО «Олкон» и ОАО «Ковдорский ГОК»); энергетический комплекс (каскад Нивских ГЭС, Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ); муниципальные стоки городов Оленегорск, Мончегорск, Кировск и Апатиты. Схема основных производств представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Карта-схема городов и промышленных площадок на водосборе оз. Имандра

4.1. Горнодобывающая промышленность

Промышленное освоение единственных в мире по своему масштабу апатит-нефелиновых месторождений на берегах оз. Имандра с огромными запасами фосфатов было начато в 1930-е гг.: в 1929 г. был введен в строй Апатитовый рудник, а в 1931 г. — первая обогатительная фабрика (АНОФ-1). 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 т апатитового концентрата (Гигант..., 1999). В годы Второй мировой войны работа рудников и обогатительных фабрик была остановлена, а производственные мощности переориентированы на оборонную промышленность (производство желтого и гранулированного фосфора и др.).

В послевоенный период апатитовая индустрия стремительно набирает мощность (рис. 4.2). Далее развитие горно-перерабатывающей промышленности в Хибинах продолжается в 1954–1964 гг., в период освоения Юкспорского и Расвумчоррского месторождений и ввода в эксплуатацию крупного Центрального рудника. В настоящее время обогащение апатит-нефелиновых руд осуществляется на обогатительных фабриках АНОФ-2 и АНОФ-3. Первая из них введена в эксплуатацию в 1963 г., нефелиновое производство на ней — в декабре 1992 г. На АНОФ-3 в 1984 г. запущен только дробильный комплекс, а с 1988 г. все производство перешло на полную схему работы. В настоящее время руда добывается на трех рудниках — на Кировском и Расвумчоррском (подземный способ) и на Восточном (открытый способ). Совокупная мощность по добыче составляет около 10,5 млн т руды в год (на 2020 г.).

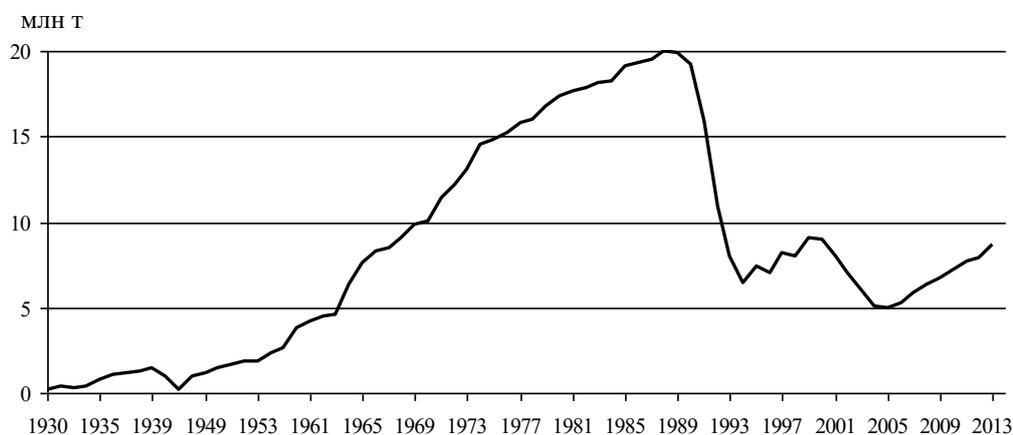


Рис. 4.2. Производство апатитового концентрата на АО «Апатит»

Обогатительные комплексы АНОФ-2 и АНОФ-3 имеют отвалы хвостов, расположенные от фабрик на расстояниях 6,5 и 2,0 км соответственно. Хвосты производства АНОФ-2 размещены в двух хвостохранилищах, одно из которых занимает акваторию оз. Сейдозеро, второе (действующее в настоящее время) занимает часть акватории оз. Имандра, ограниченной специальной дамбой высотой свыше 50 м. Общая площадь обоих составляет более 12,5 км². Откосы дамбы засажены многолетними травами, для обеспыливания горизонтальных участков и дорог производится орошение водой с латексом. Хвостохранилище АНОФ-3 общей площадью более 12,6 км² размещено в долине реки Жемчужная, вблизи пос. Титан, в нем хранятся отходы производства АНОФ-1 (после 1963 г.) и АНОФ-3. На 1 января 1997 г. в хвостохранилищах АНОФ-2 и АНОФ-3 находится 472,854 млн т отходов.

Озеро Имандра испытывало интенсивное загрязнение, которое в конце 1970-х гг. достигло максимума: ежегодно сбрасывалось 240 млн м³ отходов (рис. 4.3). Через сточные воды в водоем вносились тысячи тонн взвешенных веществ: сульфатов, хлоридов, нитратов, тонны фосфора, нефтепродуктов и других загрязняющих веществ (Al, Sr), в составе этих вод также присутствовали остаточные концентрации токсичных органических веществ, применяемых в процессе флотации апатит-нефелиновых 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 дальнейшие годы наметилась тенденция снижения сброса сточных вод, колеблющаяся в зависимости от объемов производства апатитового концентрата.

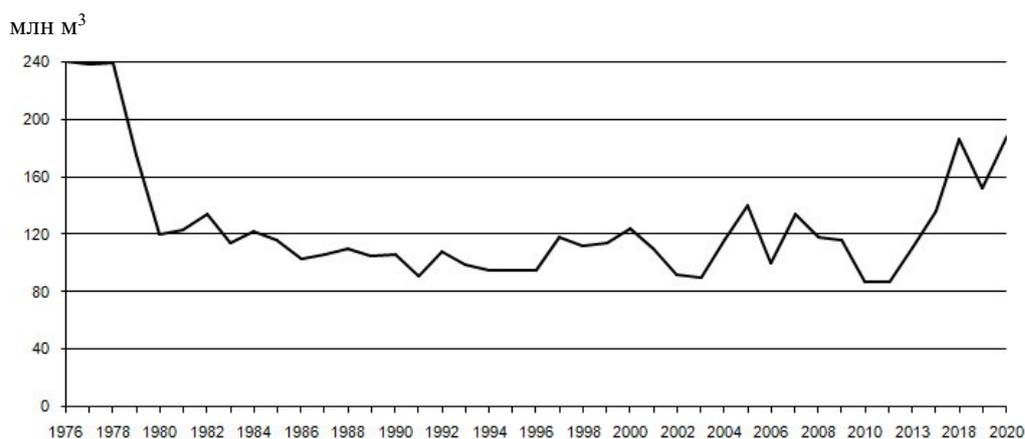


Рис. 4.3. Динамика объема сточных вод на АО «Апатит»

4.2. Металлургическая промышленность

В 1938 г. на берегу оз. Имандра был построен комбинат «Североникель», включающий плавильный комплекс по получению меди, никеля, кобальта, а также золота, серебра, платины и селена. До 1960 г. использовалась местная руда (рудник «Ниттис-Кумужье» на водосборе оз. Имандра) с высоким содержанием металлов и низким содержанием серы. Дополнительно (с 1946 г.) также использовалось сырье из рудника «Каула» (23 % серы) в Печенгском районе, вблизи российско-норвежской границы. До 1950 г. производство никеля и меди не превышало 10 и 6,3 т соответственно, в 1960 г., после расширения и реконструкции комбината, объем выпускаемой продукции увеличился в 2,7 раза.

С 1940 г. комбинат сбрасывает сточные воды в оз. Нюдьявр и далее в северо-западную часть оз. Имандра — губу Монче. Объем сточных вод в 1970 г. составлял 25 млн м³/год. С 1973 г. в производстве в основном использовалась руда из Норильска (400 тыс. т/год), содержание сульфатов в которой в 3 раза выше, чем в местном сырье. 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 1976–2020 гг. изменялся от 27,25 до 12,08 млн м³/год (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Динамика объема сточных вод на ОАО «Североникель»

Снижение объема стоков происходило в связи с выполнением ремонта сетей локальной системы оборотного водоснабжения, выполнением работ по переводу сливов оборотной воды с системы охлаждения ЭППТ «Свиндел» из производственной канализации в центральную систему оборотного водоснабжения, а также благодаря использованию в настоящее время одного выпуска для сброса сточных вод (ранее было пять). Несмотря на ввод ряда очистных сооружений и оборотных систем водоснабжения, сточная вода, поступающая в озеро, остается крайне загрязненной тяжелыми металлами (Ni, Cu). В составе сточных вод присутствуют медь, никель, кобальт, нефтепродукты, взвешенные вещества и токсичные флотореагенты — ксантогенат бутиловый и дитиофосфат крезильовый.

С 1955 г. в северной части водосбора оз. Имандра действует Оленегорский ГОК (АО «Олкон»), который добывает и обогащает железные руды — магнетит-гематитовые кварциты. Хвосты обогатительного процесса содержали в своем составе огромное количество тонких взвесей, представленных минералом гематитом. Оседая, эти взвешенные частицы сильно загрязняли донные отложения, тем самым резко повышая в них содержание железа (до 5–10 %), марганца и ванадия (Крючков, 1980). До 1975 г. стоки комбината поступали в оз. Пермусозеро, а далее в северную часть плеса Большая Имандра, в их состав входили гематитовые шлаки, железо, марганец, ванадий. В 1975 г. на производстве было введено 100 %-е оборотное водоснабжение, позволившее сократить объем стоков. При этом, несмотря на замкнутое водоснабжение, загрязняющие вещества в незначительном объеме (около 1,14 млн м³/год) продолжают поступать в губу Куреньга оз. Имандра.

В западной части водосборной площади оз. Имандра расположен Ковдорский горно-обогатительный комбинат (входит в состав минерально-химической компании «ЕвроХим») — крупный производитель железорудного

концентрата (5,7 млн т/год), второй по величине производитель апатитового концентрата в России (2,7 млн т/год) и единственный производитель бадделеитового концентрата (8,85 тыс. т/год) в мире. Первые проектные мощности Ковдорского рудоуправления были установлены в 1955 г. В настоящее время в зону влияния АО «Ковдорский ГОК» включают территорию земельных отводов самого предприятия и ООО «Ковдорслюда», находящегося в настоящий момент в стадии конкурсного управления. Загрязненные воды из карьера и промплощадки сбрасываются в западную часть оз. Ковдор. Хвостохранилища сформированы в долинах реки Можель (1) и ручья Отвальный (2). Неочищенные воды с первого хвостохранилища сбрасываются в отстойник, а со второго — непосредственно в ручей. Затем все сточные воды комбината (рис. 4.5) поступают в реку Ковдора, которая через систему многочисленных рек и озер выносит загрязняющие вещества в Пиренгские озера и далее в оз. Имандра (в западную часть плеса Йокостровская Имандра).

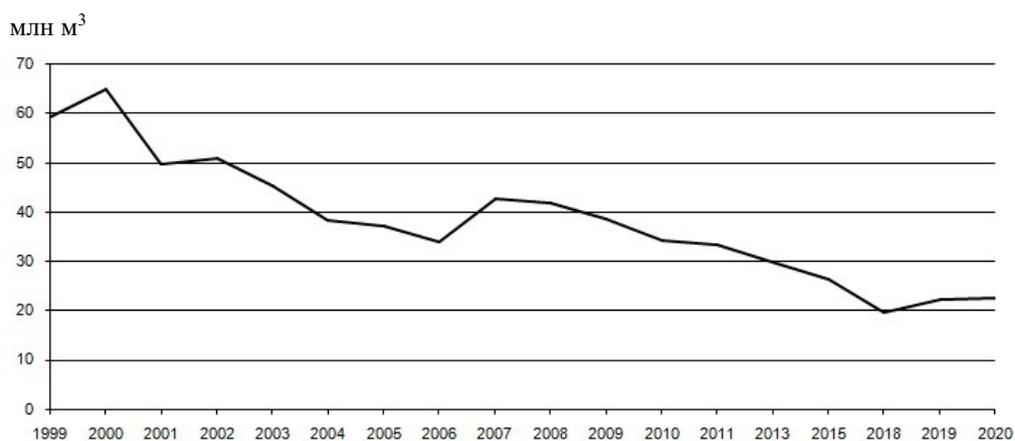


Рис. 4.5. Динамика объема сточных вод на АО «Ковдорский ГОК»

4.3. Энергетический комплекс

Энергетика — один из источников неблагоприятного воздействия на окружающую среду. В 1934 г. на единственном стоке из оз. Имандра — реке Ниве была сооружена ГЭС Нива-II, приведшая к зарегулированию стока, что нарушило естественный ход колебаний уровня воды в озере. Наибольший ущерб был 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 объема. Это вызывало неоднократное обсыхание прибрежной полосы и гибель отложенной икры.

Гидрологическими исследованиями было установлено, что постройка Нивских ГЭС привела к внутригодовому перераспределению стока воды и уровня режима. Максимальный уровень стал наблюдаться в летние и осенние месяцы, и высокий уровень воды сохраняется вплоть до декабря. Падение уровня происходит от января к апрелю — началу мая.

В результате работы ГЭС Нива-1 (эксплуатируется с 1952 г.) происходят значительные колебания уровня воды и, как следствие, осушение литорали оз. Имандра, что может негативно влиять на состояние популяций некоторых видов рыб. Подобные перепады уровня воды в первую очередь наносят ущерб сообществам зоопланктона и зообентоса, снижая их численность. Кроме того, нарушается состояние нерестилищ некоторых видов осенненерестующих рыб.

Превращение оз. Имандра в водохранилище также резко изменило режим внутренних течений, нарушив тем самым веками сложившиеся экологические связи. О наличии течений между плесами Большая, Бабинская и Йокостровская Имандра свидетельствуют их морфометрические характеристики. Район Бабинской Имандры и Йокостровской Имандры представляет собой низину, вытянутую в северо-восточном направлении резко в виде уступа, ограниченную высокими тундрами на юге, что также способствует распространению течений под действием ветра в направлении к Широкой Салме. Зашеечная губа как по характеру распределения, так и по величине глубин ближе относится к примыкающей к ней Бабинской Имандре. Известно, что течения в озере подразделяются на два типа — постоянные, вызванные уклоном уровня озера к стоку и влиянием притоков, и временные, вызванные ветрами. К сожалению, негативное влияние на водоем его зарегулирования не изучалось с момента эксплуатации Нивских ГЭС и в настоящее время достаточно трудно выявить изменения, произошедшие в экосистеме за это время.

В 1973 г. на берегу оз.Имандра была введена в строй Кольская АЭС. До 1984 г. было возведено два блока мощностью по 440 МВт, расход воды при этом составлял 40 м³/с. Впоследствии введено в эксплуатацию еще два блока и общий расход воды в период максимальной нагрузки станции составлял около 80 м³/с (Крючков и др., 1985). Для охлаждения агрегатов станция забирает воду из Йокостровской Имандры и в подогретом состоянии сбрасывает в Бабинскую Имандру. В отводной канал КАЭС поступают также сточные воды предприятия, промышленно-ливневой канализации и хозяйственно-бытовые сточные воды после прохождения через очистные сооружения. Сброс подогретых промышленных вод, используемых для охлаждения реакторов Кольской АЭС, привел к повышению температуры воды, активизации круговорота элементов и биохимических процессов в водоеме.

Таблица 4.1

Сброс вод Кольской АЭС в губу Молочную плеса Бабинская Имандра

По годам	1976	1978	1980	1981	1983	2008	2009	2011	2018	2019	2020
За год*, млн м ³	960	1260	1230	1330	1400	1344	1345	1341	1217	1150	1172
За 1 сек, м ³	30,51	39,91	38,84	42,11	44,51	42,61	42,65	42,54	38,59	36,46	37,16

*Суммарный.

После прохождения через охлаждающую систему Кольской АЭС вода направляется по сбросному каналу в губу Молочную. В среднем за последние годы суммарный сброс составляет 1172 млн м³/год (табл. 4.1). Данные о сбросах взяты из «Докладов о состоянии и об охране окружающей среды» Комитета

природопользования Мурманской обл. за 1976–1983 и 2008–2020 гг. и «Докладов об экологической безопасности Кольской АЭС» за 1918–2020 гг.

Объем сбрасываемых подогретых вод КАЭС даже выше объема воды, поступающей по рекам Пасма, Вандас и мелким притокам в плес Бабинская Имандра (1,097 км³), или же составляет примерно третью часть общего расхода воды из озера по р. Нива (4,951 км³). Таким образом, полный водообмен в плесе Бабинская Имандра с учетом еще одного компонента водного баланса — осадков происходит приблизительно менее чем за 1 год, полный водообмен в оз. Имандра совершается приблизительно за 2 года.

Термальный фактор воздействует локально и характерен в основном для губы Молочной и прилегающей к ней акватории плеса. Подогретые воды поступают в губу Молочную с температурой, превышающей температуру воды, забираемой из плеса Йокостровская Имандра, в среднем на 5–13 °С в зависимости от сезона. В 1973 г. изменения затрагивали только внутреннюю часть губы Молочной — на расстоянии до 1,5 км от устья сбросного канала. В зимний период размер полыньи не превышал 2 км² (Комплексное..., 1976; Крючков и др., 1985). В настоящее время наиболее существенные устойчивые изменения в гидрологическом и температурном режимах наблюдаются на ограниченном участке водоема площадью около 8 км². В период наиболее интенсивного прогрева воды в озере подогретые воды распространяются до северо-западной оконечности полуострова Роват — на расстояние 9–12 км от устья сбросного канала АЭС, из-за чего отличные от естественных температурные условия водных масс наблюдаются на площади до 20 км² (в 2018 г.). На остальных участках плеса Бабинская Имандра сохраняется естественный или близкий к нему температурный режим.

В энергетический комплекс входит Апатитская ТЭЦ, сбрасывающая сточные воды в реку Белую.

4.4. Хозяйственно-бытовые стоки

Значительный вклад в загрязнение оз. Имандра вносят и предприятия жилищно-коммунального хозяйства — ОАО «Апатитыводоканал», ОАО «Мончегорскводоканал» и ГОУП «Оленегорскводоканал», которые одновременно с промышленными отходами в одни и те же участки озера сбрасывают хозяйственно-бытовые стоки городов и поселков.

На водосборной площади озера в настоящее время проживает около 173,6 тыс. человек (на 2021 г.), причем надо отметить, что по численности городского населения (94,3 %) Мурманская обл. занимает 4-е место среди регионов России¹. Ранее на данной территории проживало около 300 тыс. человек, т. е. население городов за последние 30 лет уменьшилось на 40 %².

Водоотведение хозяйственно-бытовых и ливневых вод городов Кировск и Апатиты (около 14,7 млн м³/год) осуществляется по р. Жемчужная и далее по р. Белая в губу Белую оз. Имандра. В губу Монче одновременно со стоками

¹ См.: Ежегодные доклады о состоянии окружающей среды Мурманской области // Правительство Мурманской области: офиц. сайт. URL: <http://www.gov-murman.ru/region/environmentstate> (дата обращения: 12.05.2020).

² См.: Общая численность населения Мурманской области. URL: <http://finance.rambler.ru/> (дата обращения: 05.11.2020).

«Североникеля» поступают хозяйственно-бытовые стоки г. Мончегорска (около 4,78 млн м³/год). Сточные воды г. Оленегорска (около 2,1 млн м³/год) поступают в оз. Пермусозеро, которое связано небольшой протокой с Большой Имандрой и является одновременно питьевым источником. 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. В реку Ниж. Ковдора осуществляется сброс хозяйственно-бытовых стоков после канализационных очистных сооружений г. Ковдор и агрокомплекса пос. Лейпи. Имандра также испытывает влияние расположенной вдоль водоема автомагистрали Мурманск — Санкт-Петербург. В зоне негативного влияния ОАО «Североникель» находится источник питьевого водоснабжения города Мончегорска — озеро Монче, а влияние АО «Апатит» негативно сказывается на качестве всего оз. Имандра, как источника питьевого водоснабжения г. Апатиты. Таким образом, изначально все источники водоснабжения в той или иной степени находятся под воздействием загрязнения.

4.5. Аэротехногенное загрязнение

Аэротехногенная нагрузка на Кольском Севере связана, прежде всего, с функционированием медно-никелевых металлургических комплексов и с трансграничным переносом воздушных масс из индустриальной Европы в Арктику (Моисеенко, Яковлев, 1990; Калабин, 2000). Приоритетными загрязнителями воздуха Кольского полуострова³, включая водосбор оз. Имандра, среди жидких и газообразных веществ являются сернистый газ (91,2 %) и монооксид углерода (2,8 %), среди твердых — апатитонепелиновая (62 %) и неорганическая пыль (37 %), в том числе тяжелые металлы, которые представляют наибольшую опасность в выбросах (рис. 4.6).

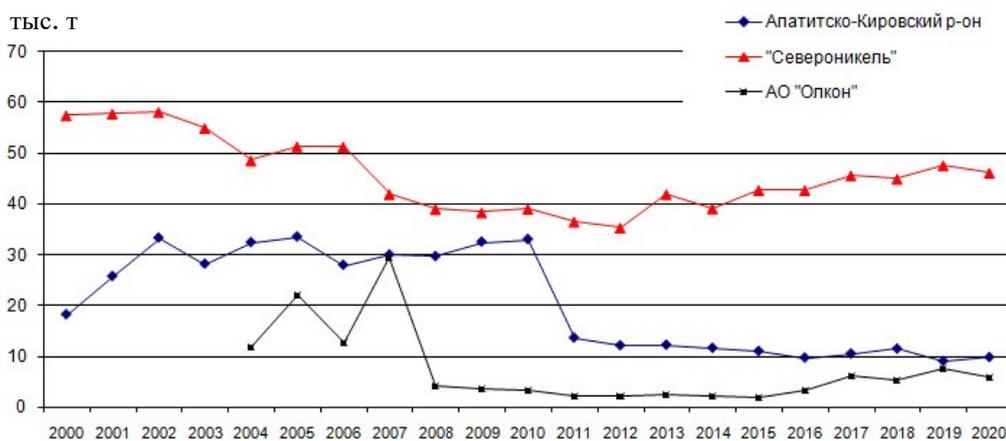


Рис. 4.6. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу на территории водосбора оз. Имандра

³ См.: Ежегодные доклады о состоянии окружающей среды Мурманской области // Правительство Мурманской области: офиц. сайт. URL: <http://www.gov-murman.ru/region/environmentstate> (дата обращения: 28.09.2021).

Суточное выпадение загрязняющих веществ в зимний период на водосборе оз. Имандра (район Лапландского заповедника) составляет: никеля — 15 мкг/м²; меди — 8 мкг/м². В сутки вблизи комбината «Североникель» на открытую местность выпадает: никеля — 400 мкг/м², меди — 430 мкг/м² (Калабин, 2000). Экспериментальные работы, проведенные на территории Кольского полуострова, показали, что в период вегетации металлы задерживаются почвами: никель — на ±95 %, медь — на 99 % (Никонов и др., 1993).

Литература

1. Гигант в Хибинах / А. В. Барабанов, Т. А. Калинина, А. А. Киселев, А. И. Краснобаев. Москва : Руда и металлы, 1999. 288 с.
2. Исследование техногенных изменений химического состава и биоценозов водоемов Кольского Севера : отчет НИР / рук. В. В. Крючков ; исполн.: Чижиков В. В., Моисеенко Т. И. // [Фонды Кольского филиала АН СССР]. Апатиты, 1980. 244 с.
3. Калабин, Г. В. Экодинамика техногенных провинций Севера : монография / Г. В. Калабин. Апатиты : КНЦ РАН, 2000. 292 с.
4. Комплексное изучение Йокостровской и Бабинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема : отчет НИР / рук. Чижиков В. В., исполн.: Воробьева Д. Г., Моисеенко Т. И. [Фонды Кольского филиала АН СССР]. Апатиты, 1976. Т. 1. 269 с.
5. Крючков, В. В. Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья : монография / В. В. Крючков, Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Апатиты : КФАН СССР, 1985. 132 с.
6. Миграция и аккумуляция соединений никеля и меди в Al-Fe-гумусовых подзолистых почвах сосновых лесов (зона воздействия комбината «Североникель») / В. В. Никонов, Н. В. Лукина, Д. Дером [и др.] // Почвоведение. 1993. № 11. С. 31–41.
7. Моисеенко, Т. И. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера : монография / Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Ленинград : Наука, 1990. 220 с.

5. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ИМАНДРА

Энергетика — один из источников неблагоприятного воздействия на окружающую среду. Энергетические объекты (энергетический комплекс вообще и объекты энергетики в частности) по степени влияния на окружающую среду принадлежат к числу наиболее интенсивно воздействующих на биосферу. Атомные электростанции и, в частности, Кольская АЭС осуществляют значительно большие сбросы теплых вод в водные бассейны, чем ТЭС, при одинаковых параметрах, что повышает интенсивность теплового загрязнения водоемов. Считается, что потребление охлаждающей воды на АЭС примерно в три раза больше, чем на современных ТЭС. На Кольской АЭС применяется система с водоохлаждаемыми реакторами.

На гидрологический режим озера, помимо сбросов теплых нормативно чистых сточных вод Кольской АЭС, влияет работа ГЭС Нива-1, в 1936 г. построенной в истоке р. Нива. В совокупности они создают новую экологическую обстановку в зоне их воздействия: значительно повышается температура воды; усиливаются течения; происходит изменение рельефа дна и характера донных отложений. За счет термического эвтрофирования возрастает продуктивность водоема, в результате активизации биохимических процессов в теплой воде изменяется химический состав вод.

Кольская АЭС (после ввода ее в строй в 1973 г.) для охлаждения своих реакторов забирает уже загрязненные промышленными предприятиями воды из Йокостровской Имандры и перекачивает⁴ по каналу в губу Молочную Бабинской Имандры. В итоге в зоне подогрева происходит целый ряд изменений, которые можно определить как комплексное техногенное воздействие сбросных вод Кольской АЭС. Учитывая весь комплекс влияния КАЭС и ГЭС, возникает необходимость разносторонней оценки условий распространения водных потоков по акватории оз. Имандра и влияния на различные компоненты экосистемы. Для этого нужно было уточнить батиметрию плесов Бабинская и Йокостровская Имандра в зоне циркулирующих потоков технологических вод Кольской АЭС и оценить влияние сезонных факторов на гидрофизические характеристики.

5.1. Морфометрическая характеристика

Имандра — самый крупный водоем на Кольском полуострове и один 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 12 300 км² (рис. 5.1).

Водоем состоит из трех в значительной мере самостоятельных плесов — Большой, Йокостровской и Бабинской Имандры, соединяющихся между собой узкими проливами (рис. 5.2).

Сток из озера один — в реку Ниву из Йокостровской Имандры и далее в Кандалакшский залив Белого моря (Ресурсы..., 1970). Форма плесов чрезвычайно сложная, отвечает разнообразию рельефа побережья. Плесы Йокостровская и Бабинская Имандра простираются в широтном направлении.

⁴ Объем около 1183,33 млн м³ в год (Отчет..., 2020).

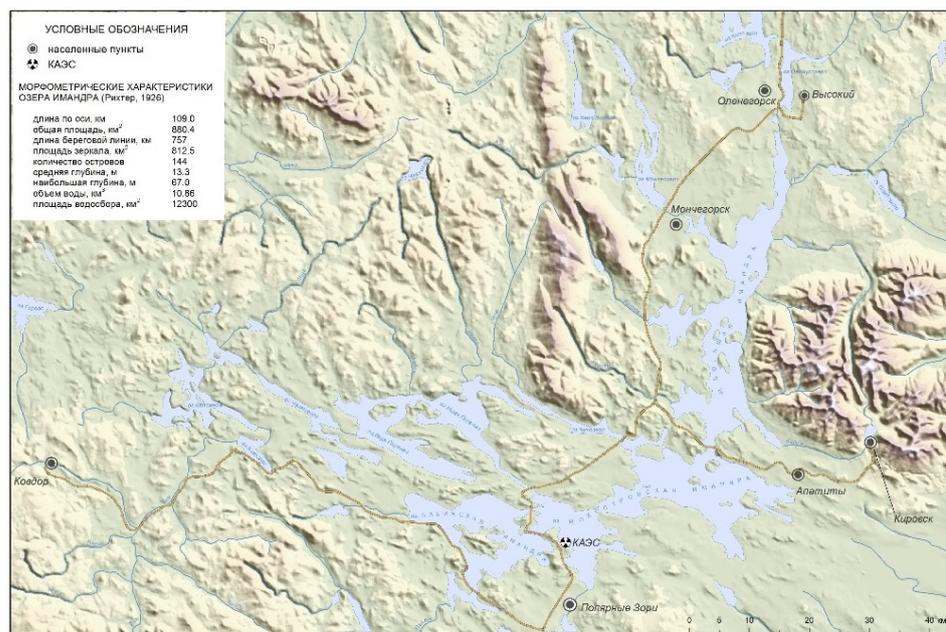


Рис. 5.1. Водосборный бассейн оз. Имандра

Йокостровская Имандра имеет наибольшую площадь — 361,9 км² и в двух пересечениях — большую ширину: напротив губы Охтокандской — 18,7 км и в районе Зашеечной губы — 13,7 км. Эти заливы, а также Тик-губа и Княжая — наиболее крупные. Южный берег этой части в противоположность ступенчатому северо-западному довольно прямолинеен. В западной части плес соединяется с Бабинской Имандрой через пролив Широкая Салма, последний имеет 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). Морфометрическая характеристика плесов приведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1
 Морфометрические показатели озера Имандра (Работы..., 1926)

Параметры	Большая Имандра	Йокостровская Имандра	Бабинская Имандра
Длина по оси, км	54,7	44,6	21,4
Длина береговой линии, км	285,8	266,6	204,6
Общая площадь, км ²	327,5	361,9	191,0
Площадь зеркала, км ²	311,6	352,2	148,7
Количество островов	80	42	22
Наибольшая глубина, м	67,0	42,0	43,5
Средняя глубина, м	14,7	10,9	16,3
Объем воды, км ³	4,58	3,85	2,43
Площадь водосбора, км ²	4992,5	6070,0	1237,5

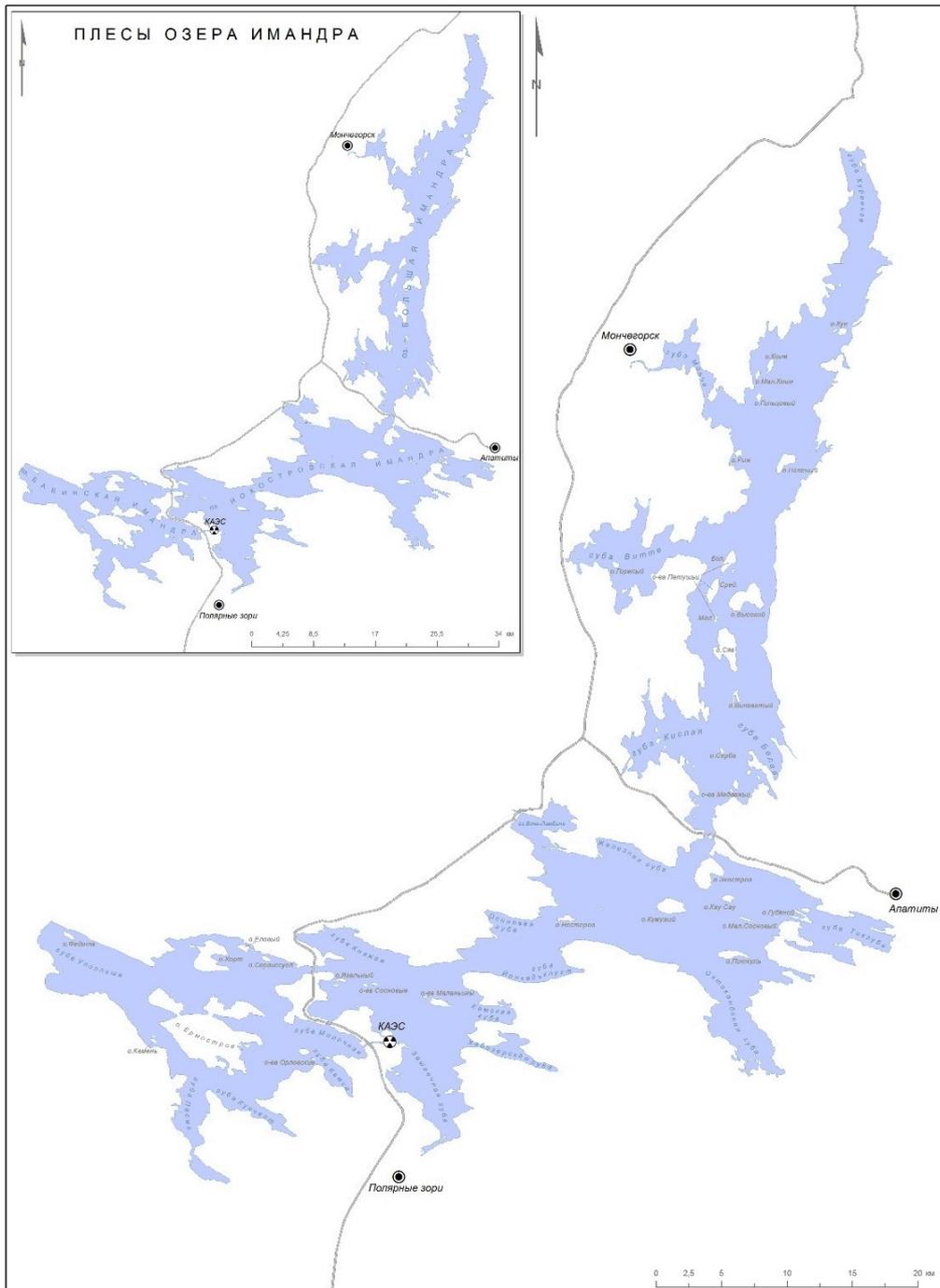


Рис. 5.2. Плесы, заливы, острова оз. Имандра

Почти 25 % всего озера составляют глубины 15–20 м. Еще резко выделяются по площади глубины 15–20 м в Большой Имандре — 36,4 % всей водной поверхности. Глубины 10–15 м здесь занимают менее половины площади (17,8 %), глубины 20–25 м — всего треть площади (12,3 %).

В Йокостровской Имандре наибольшая площадь за глубинами 5–10 м (25,3 %), площади, занимаемые глубинами как 0–5 м, так и 10–15 м, лишь немного отличаются предыдущей, так что общая площадь с глубинами до 15 м составляет 73,5 % всей открытой водной поверхности.

По характеру рельефа и глубинам Йокостровская Имандра может быть разделена на две самостоятельные части: к востоку от Заячьей Салмы и к западу от нее. Зашеечная губа как по характеру распределения, так и по величине глубин ближе относится к примыкающей к ней Бабинской Имандре. Более ясно выраженное обособление Бабинской Имандры у острова Роват заставляет отнести Зашеечную губу к Йокостровской Имандре, в то время как в Зашеечной части наибольшую площадь (22,7 %) занимают глубины 15–20 м. В собственно Йокостровской Имандре эти глубины составляют всего лишь 13,5 % площади, а наибольшая часть приходится на глубины 5–10 м (рис. 5.3). Самую большую площадь в Бабинской Имандре занимают глубины 10–15 м (25,2 %) и 15–20 м (20,4 %).

При исследованиях необходимо учитывать, что в оз. Имандра полный водообмен происходит приблизительно за 2 года. Полный водообмен в плесе Бабинская Имандра с учетом дополнительного компонента водного баланса — осадков происходит приблизительно менее чем за 1 год.

По наиболее крупным притокам Бабинской Имандры — Пасма и Вандас в плес ежегодно поступает 1,097 км³ поверхностных вод (табл. 5.2), и вместе с притоком теплых вод Кольской АЭС (1,172 км³/год) общий объем притока поверхностных вод составляет 2,269 км³/год, что сопоставимо с объемом плеса.

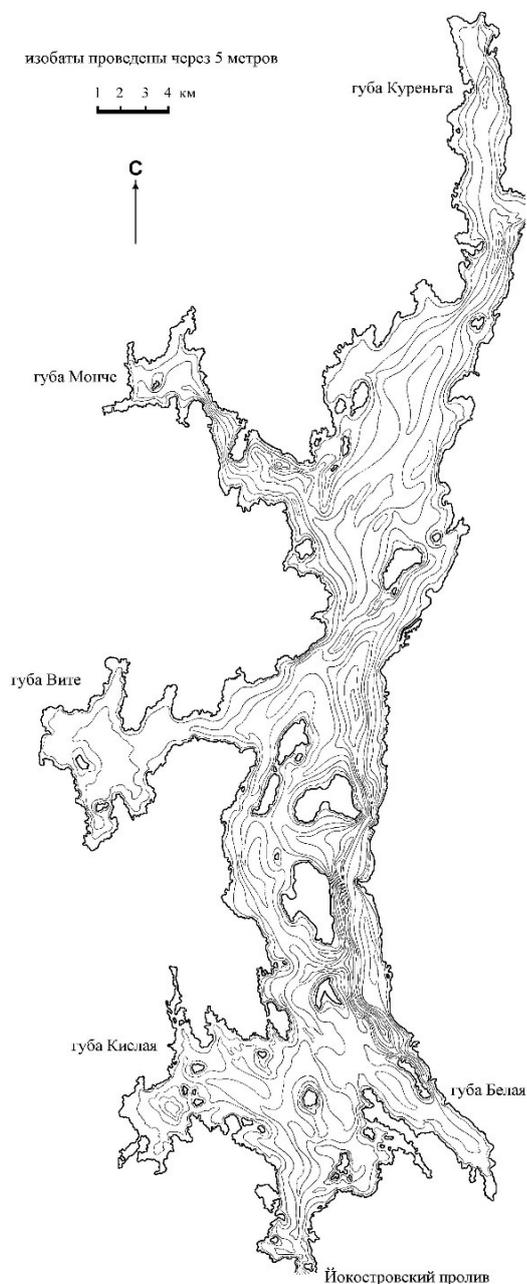
Таблица 5.2

Характеристика наиболее крупных рек водосборов озера Имандра

Реки	Площадь водосбора, км ²	Расход, м ³ /сек	Объем стока, км ³
Большая Имандра			
Куркенйок	176,8	3,37	0,106
Печа	653,1	6,7	0,211
Монче	1583,5	20,5	0,634
Гольцовка	92,3	1,84	0,058
Вите	236,2	5,68	0,179
Белая	236,1	4,72	0,148
Йокостровская Имандра			
Чуна	570,8	9,88	0,331
Пиренга	4260,0	54,1	1,71
Бабинская Имандра			
Пасма	3080,0	32,34	1,02
Вандас	216,2	2,39	0,077

С целью определения особенностей гидрологических характеристик акватории оз. Имандра комплексные исследования водоема проводились в 2011–2012 гг. Гидрологические наблюдения включали в себя изучение динамики водных масс и температурного режима оз. Имандра.

Промеры глубин проводились в соответствии с «Наставлением гидрометеорологическим постам и станциям». Измерение глубин производилось с лодки водомерными тросами и с помощью эхолота HUMMINGBIRD 450.



Для изучения сезонного характера распространения подогретых вод и вертикального распределения физических параметров (температура и растворенный кислород) по глубине производились измерения в поверхностном слое (0,1 м), на глубине 10 и 20 м и в придонном слое с помощью портативного экспедиционного прибора WTW ProfiLine Multi 197i. Наблюдения производились на 40 отдельных станциях в плесах Йокостровская и Бабинская Имандра (рис. 5.4).

В губе Молочная, для того чтобы выявить сезонный характер распределения температуры и растворенного кислорода, наблюдения проводились на четырех гидрологических профилях через каждые 2 м глубины.

Наличие течений между плесами Большая, Бабинская и Йокостровская Имандра подтверждают морфометрические характеристики этих объектов. Район Бабинской и Йокостровской Имандры представляет собой низину, вытянутую в северо-восточном направлении, резко в виде уступа ограниченную высокими тундрами на юге, что также способствует распространению течений под действием ветра в направлении к Широкой Салме.

Рис. 5.3. Карта-схема преобладающих глубин в оз. Имандра (начало)

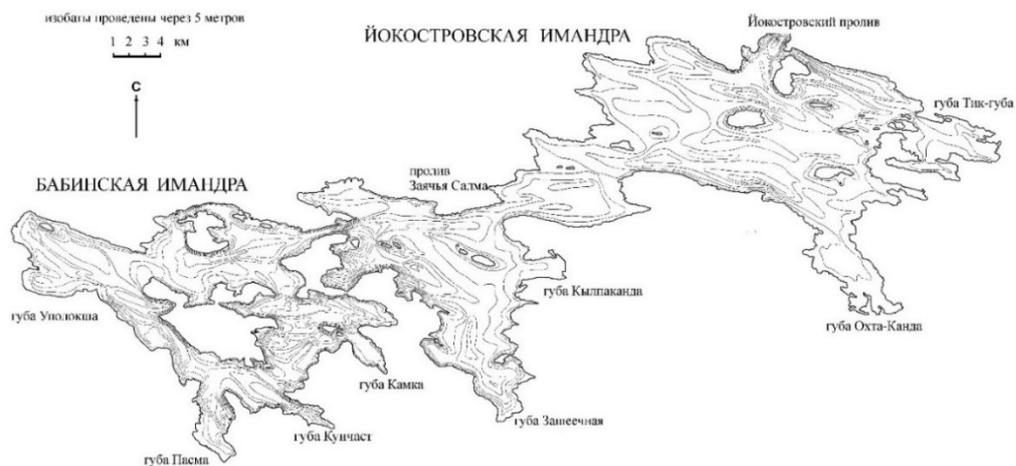


Рис. 5.3. Карта-схема преобладающих глубин в оз. Имандра (окончание)

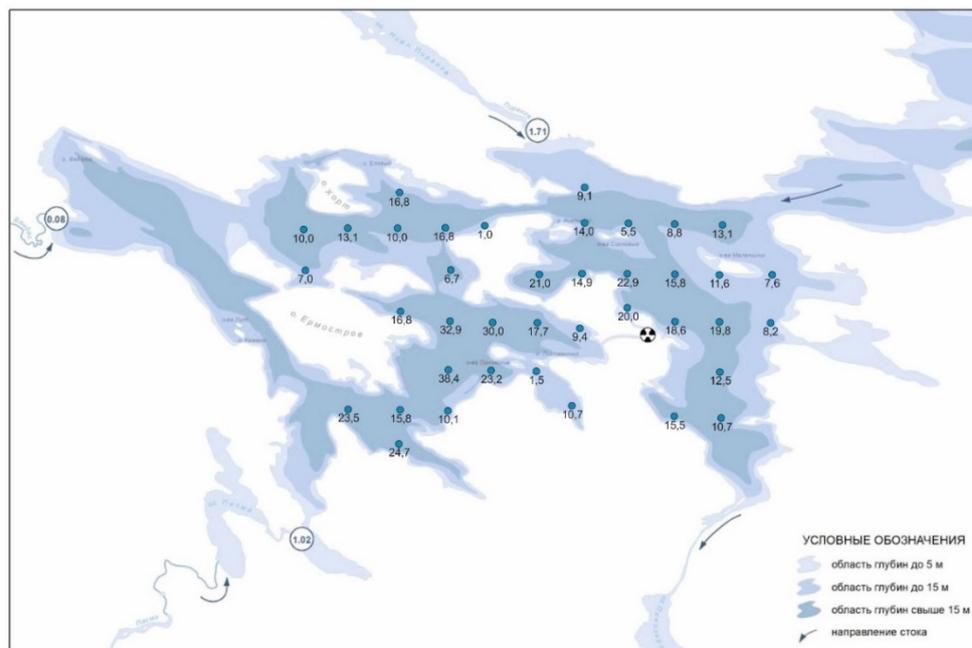


Рис. 5.4. Карта-схема южных плесов оз. Имандра и станций измерения физических параметров с указанием глубин

Зашеечная губа как по характеру распределения, так и по величине глубин ближе относится к примыкающей к ней Бабинской Имандре. Известно, что течения в озере подразделяются на два типа — постоянные, вызванные уклоном уровня озера к стоку и влиянием притоков, и временные, вызванные ветрами. Летом, когда увеличивается повторяемость антициклонов, направление ветра становится неустойчивым, но преобладают ветры восточных румбов, т. е. от губы Молочной к Широкой Салме (Ресурсы..., 1970). Ветры с остальных направлений редки. Конвекционные течения, вызванные отличиями температур различных

участков и глубинных слоев, в целом по оз. Имандра невелики, но в плесе Бабинская Имандра, как наиболее глубоком, должны иметь большое значение в циркуляции вод озера.

Скорость течения воды в канале зависит от режима работы АЭС, а вблизи устья — и от уровня воды в озере. Так, скорость течения подогретых вод между автодорожным мостом и оградительными дамбами составляет в среднем 0,94–1,18 м/с. Высокая скорость течения подогретых вод в канале обуславливает интенсивное перемешивание и отсутствие вертикальной температурной стратификации.

5.2. Режим уровней воды

Для годового хода уровня воды озер Кольского полуострова характерен весенний подъем, с постепенным спадом к осени и зиме, который прерывается небольшими подъемами во время осенних дождей. В течение зимы уровень почти неизменен. Весенний подъем уровня воды начинается чаще всего в начале мая и достигает максимальных значений в июне, которые сохраняются до 4 дней. Спад уровней продолжается, как правило, до конца июля — начала августа. Низшие уровни устанавливаются обычно в августе. Годовая амплитуда уровней воды в среднем по озерам Кольского полуострова составляет 0,7–1,8 м (Ресурсы..., 1970), на оз. Имандра в период 1925–1934 гг. — 0,81 м (Материалы..., 1940). С преобразованием оз. Имандра в водохранилище уровеньный режим его существенно изменился в результате подпора плотиной Нива ГЭС-1. Высший уровень, как и раньше, наблюдается в конце июня, низший — с конца апреля по начало мая, в период предвесенней сработки, в отдельные годы амплитуда колебаний увеличивается до 1,5 м.

Анализ годовой сработки уровня воды Имандровского водохранилища за период с 1964 по 2021 гг. показал, что только в шести случаях уровень воды достигал НПУ и ни разу не снижался до горизонта мертвого объема. Тренд изменения годовой сработки уровня воды был в пределах 0,95–1,53 м. В течение 2021 г. с использованием водомерной линейки проводились наблюдения за изменением уровня воды в плесах Бабинская и Йокостровская Имандра. Их основная цель — выявить перепад уровня воды в озере. Установлено, что в течение зимы наблюдалось понижение уровня воды и активное заполнение озера началось в третьей декаде мая и продолжалось до первой декады июля. Затем уровень, с незначительным понижением в конце июля до начала октября, оставался на постоянном уровне к началу ледостава в середине ноября. Такие колебания связаны с климатическими условиями данного года. В 2021 г. высший уровень (127,31 м) наблюдался в конце июня — начале июля, низший (126,22 м) уровень — в первой половине мая, т. е. перепад уровней составил 1,09 м (рис. 5.5). Для сравнения: в 1926 г., до строительства Нивских ГЭС, перепад уровней составлял 0,80 м, а одно из наибольших значений — 1,81 м — отмечено в 1998 г.

Значительные колебания уровня воды, происходящие в результате работы ГЭС Нива-1, как следствие, приводят к осушению литорали оз. Имандра, что, в свою очередь, негативно влияет на состояние популяций некоторых видов рыб. Подобные перепады уровня воды в первую очередь наносят ущерб сообществам зоопланктона и зообентоса, снижая их численность. Кроме того, нарушается состояние нерестилищ некоторых видов осенненерестующих рыб.

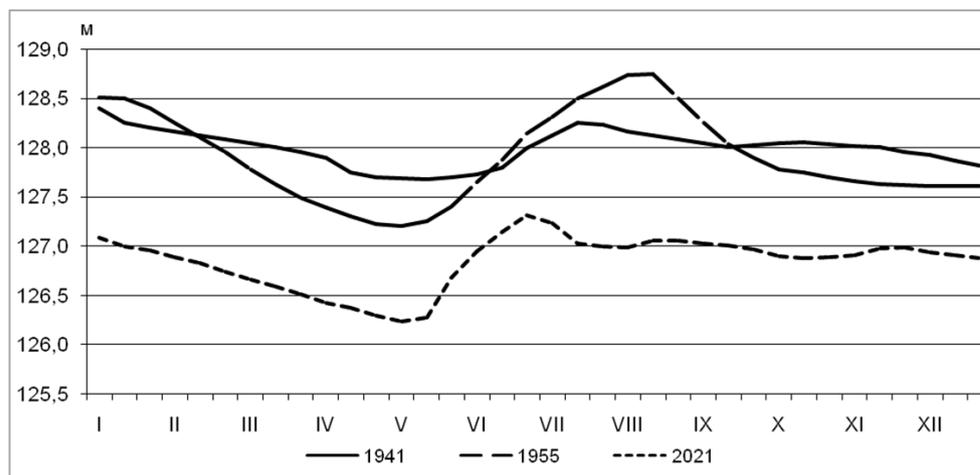


Рис. 5.5. График колебаний уровня воды оз. Имандра

Создание водохранилища из оз. Имандра также резко изменило режим внутренних течений, нарушив тем самым веками сложившиеся экологические связи. К сожалению, последствия зарегулирования озера не изучались с момента эксплуатации Нивских ГЭС и в настоящее время достаточно трудно выявить изменения, произошедшие в экосистеме за это время.

Гидрологическими исследованиями было установлено, что постройка Нивских ГЭС привела к внутригодовому перераспределению стока воды и уровня режима. Максимальный уровень стал наблюдаться в летние и осенние месяцы, и высокий уровень воды сохраняется вплоть до декабря. Падение уровня происходит от января к апрелю — началу мая. При сработке уровня осушаются значительные площади акватории, которые могут значительно увеличиваться в экстремальные годы. Величина сработки уровня водохранилища ниже установленной отметки (126 м) в 2019 г. составила 0,12 м, при этом осушенная площадь водохранилища достигала 2296 га, или 2,1 % всей его площади.

Литература

1. Материалы к изучению поверхностных вод Кольского полуострова // [Фонды КНЦ АН СССР. Сб. 1]. Мурманск, 1940. 406 с.
2. Отчет об экологической безопасности Кольской АЭС. Полярные Зори, 2020. 40 с.
3. Работы Мурманской биологической станции Ленинградского общества естествоиспытателей / редакционная коллегия: В. А. Догель, Г. А. Клюге, Д. М. Федотов. Ленинград : Мурманск. губ. испол. ком. сов. р., рыбацких и к. д., 1926. Т. 2. 158 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР : в 20 томах. Т. 1 : Кольский полуостров / под редакцией Ю. А. Елшина, В. В. Куприянова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 324 с.

6. ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ИМАНДРА

Озеро Имандра с 1930-х гг. испытывает долговременное многофакторное воздействие, в результате которого произошла трансформация его природного состояния (Комплексное..., 1976; Крючков и др., 1985; Моисеенко, Яковлев, 1990; Антропогенные..., 2002). Сток загрязнений имеет выраженное направление с севера (плес Большая Имандра), где расположены основные промышленные предприятия, на юг (плес Йокостровская Имандра). До строительства Кольской АЭС поток загрязнений не затрагивал плеса Бабинская Имандра, что обуславливало различие гидрохимических режимов различных частей водоема, и он, в силу своей удаленности, являлся наименее трансформированным плесом. В 1973 г. на узком перешейке, разделяющем Йокостровскую и Бабинскую Имандру, была построена КАЭС, где в 1973, 1974, 1981 и 1984 гг. в строй вступили четыре энергоблока. Вода для охлаждения забирается из Йокостровской Имандры, а затем подогретая сбрасывается по отводящему каналу в губу Молочную (Бабинская Имандра). В итоге в зоне подогрева происходит целый ряд изменений, которые можно определить как комплексное техногенное воздействие сбросных вод КАЭС на водоем.

Как известно, в Большую Имандру сбрасываются хозяйственно-бытовые стоки городов, сточные воды комбинатов ОАО «Кольская ГМК», ОАО «Апатит» и других промышленных предприятий, которые содержат натрий, сульфаты, хлориды и другие загрязняющие вещества (Ni, Cu). Общий объем недостаточно очищенных сточных вод в озеро — около 172,47 млн м³ (Доклад..., 2020).

Целью данной работы было дать современную гидрохимическую характеристику вод всей акватории оз.Имандра (включая и отдельные губы), оценить пространственную и временную динамику их техногенной трансформации, роль промышленных предприятий и КАЭС в этом процессе, а также установить фоновые значения основных гидрохимических параметров вод для крупного водоема Кольского полуострова.

6.1. Минерализация воды и основной ионный состав

Одними из основных показателей гидрохимического состава воды, изменяющихся под влиянием техногенного воздействия на водоемы, являются минерализация и соотношение ионов. Поступление в водоем сточных вод комбинатов АО «Кольская ГМК», АО «Апатит» и других промышленных предприятий, содержащих натрий, сульфаты, хлориды и другие загрязняющие вещества (Ni, Cu), а также хозяйственно-бытовых стоков городов, привело к росту минерализации воды и к закономерной трансформации ионного состава (табл. 6.1).

Как упоминалось в более ранних работах (Верещагин, 1930; Материалы..., 1940; Ресурсы..., 1970), гидрохимический режим оз. Имандра был типичен для большинства водоемов Севера и определялся режимом питающих рек. До начала индустриального развития в Мурманской обл. доминирующую роль в снабжении озерной воды кальцием, натрием и магнием играли процессы химического выветривания силикатов и алюмосиликатов.

Основные гидрохимические параметры в плесах оз. Имандра (числитель — медиана, знаменатель — min-max)

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
Большая Имандра (губа Куреньга)									
1974–1975 ^{1*}	<u>7,47</u> 7,22–7,76	–	–	–	–	–	<u>4,0</u> 0,8–5,2	–	–
1991–1995 ^{4*}	<u>7,22</u> 6,63–7,39	<u>3,8</u> 3,3–5,5	<u>1,2</u> 1,1–1,8	<u>13,2</u> 4,2–14,7	<u>1,8</u> 1,2–2,4	<u>19,1</u> 18,2–20,0	<u>22,3</u> 7,0–25,2	<u>5,5</u> 3,1–6,8	<u>67,6</u> 39,1–71,6
1996–1998 ^{4*}	<u>7,00</u> 6,86–7,09	<u>3,4</u> 2,6–3,9	<u>1,2</u> 1,0–1,4	<u>12,0</u> 3,5–14,7	<u>1,4</u> 0,9–2,5	<u>16,7</u> 13,4–19,2	<u>19,6</u> 2,7–23,6	<u>4,7</u> 1,8–5,6	<u>60,7</u> 28,1–67,9
2001–2006	<u>7,14</u> 6,88–7,56	<u>3,7</u> 2,9–4,3	<u>1,2</u> 1,0–1,3	<u>11,0</u> 6,2–15,2	<u>2,1</u> 1,5–2,4	<u>20,1</u> 15,4–21,1	<u>16,7</u> 11,6–24,1	<u>4,6</u> 2,7–5,0	<u>59,8</u> 42,8–72,5
2009–2018	<u>7,27</u> 7,19–7,36	<u>3,8</u> 3,2–4,2	<u>1,2</u> 1,1–1,4	<u>13,3</u> 9,5–14,9	<u>2,1</u> 1,8–2,2	<u>20,8</u> 19,0–21,7	<u>18,4</u> 14,4–20,4	<u>6,2</u> 4,4–7,7	<u>65,8</u> 53,7–72,1
Большая Имандра (губа Монче)									
1974–1975 ^{1*}	<u>7,09</u> 6,82–7,46	–	–	–	–	–	<u>12,0</u> 1,2–31,2	–	–
1978–1979 ^{2*}	<u>7,00</u> 6,60–7,30	–	–	<u>19,5</u> 6,4–40,4	<u>1,5</u> 0,8–2,6	–	<u>16,9</u> 4,1–103,5	–	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,00</u> 6,30–8,20	<u>3,6</u> 2,4–4,8	<u>2,2</u> 2,0–10,9	<u>12,7</u> 2,1–53,8	<u>1,1</u> 0,5–2,6	<u>13,4</u> 2,4–28,1	<u>29,5</u> 7,6–92,4	<u>3,0</u> 0,5–16,0	<u>64,3</u> 26,5–118,9
1991–1995 ^{4*}	<u>7,16</u> 6,64–7,46	<u>3,9</u> 1,3–5,8	<u>1,4</u> 0,5–2,1	<u>18,5</u> 2,1–39,4	<u>1,5</u> 0,5–2,4	<u>18,8</u> 6,9–24,5	<u>33,3</u> 5,1–64,5	<u>7,5</u> 1,8–15,3	<u>85,4</u> 19,4–149,7
1996–1998 ^{4*}	<u>7,14</u> 6,92–7,49	<u>3,4</u> 3,0–4,3	<u>1,2</u> 1,0–1,9	<u>12,7</u> 6,5–29,7	<u>1,7</u> 1,3–4,1	<u>15,9</u> 10,4–22,0	<u>22,3</u> 14,0–50,0	<u>5,0</u> 3,0–9,2	<u>64,2</u> 39,5–120,5
2001–2006	<u>7,29</u> 7,08–7,72	<u>3,6</u> 3,0–3,9	<u>1,3</u> 1,1–1,8	<u>21,4</u> 9,6–34,8	<u>2,2</u> 1,3–2,9	<u>21,0</u> 12,7–24,3	<u>35,1</u> 15,7–58,3	<u>7,1</u> 4,6–12,6	<u>88,6</u> 49,9–131,9

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
2009–2018	<u>7,27</u> 6,23–7,38	<u>3,8</u> 2,2–4,4	<u>1,2</u> 0,6–2,2	<u>20,9</u> 1,9–36,4	<u>1,9</u> 0,5–2,7	<u>20,8</u> 4,5–22,9	<u>27,8</u> 4,2–47,2	<u>10,4</u> 1,7–19,4	<u>86,6</u> 15,7–130,8
Большая Имандра (губа Вите)									
1981–1986 ^{3*}	<u>7,25</u> 7,10–7,40	<u>4,0</u> 4,0–4,0	<u>2,0</u> 2,0–2,0	<u>10,3</u> 6,7–13,8	<u>2,0</u> 1,3–2,7	<u>15,9</u> 13,4–18,3	<u>32,1</u> 25,1–39,1	<u>4,0</u> 2,0–6,0	<u>70,2</u> 54,5–85,9
1991–1995 ^{4*}	<u>7,05</u> 7,04–7,05	<u>3,3</u> 3,3–3,4	<u>1,0</u> 0,9–1,0	<u>8,2</u> 7,9–8,5	<u>1,4</u> 1,3–1,5	<u>13,4</u> 13,3–13,5	<u>15,8</u> 15,4–16,2	<u>3,9</u> 3,8–4,0	<u>46,9</u> 45,9–47,9
2001–2006	<u>7,33</u> 7,30–7,35	<u>3,6</u> 3,5–3,7	<u>1,0</u> 1,0–1,0	<u>13,9</u> 13,6–14,2	<u>2,0</u> 1,9–2,1	<u>20,2</u> 20,1–20,4	<u>23,4</u> 22,7–24,1	<u>4,4</u> 4,3–4,5	<u>68,5</u> 67,0–70,0
2009–2018	<u>7,20</u> 6,80–7,34	<u>3,8</u> 3,5–4,0	<u>1,0</u> 0,9–1,1	<u>11,0</u> 8,5–13,4	<u>1,6</u> 1,5–2,4	<u>19,1</u> 17,4–19,6	<u>15,8</u> 13,4–18,4	<u>5,1</u> 3,8–6,3	<u>57,4</u> 49,2–67,4
Большая Имандра (губа Белая)									
1974–1975 ^{1*}	<u>7,65</u> 6,94–7,99	–	–	–	–	–	<u>9,8</u> 4,4–22,4	–	–
1978–1979 ^{2*}	<u>7,40</u> 7,10–8,10	–	–	<u>15,3</u> 11,9–24,2	<u>4,0</u> 3,3–11,2	–	<u>10,0</u> 4,5–38,7	<u>2,5</u> 2,0–6,5	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,70</u> 6,50–8,40	<u>4,6</u> 1,6–9,6	<u>2,0</u> 0,9–3,4	<u>17,2</u> 11,0–34,6	<u>3,9</u> 3,0–8,6	<u>23,6</u> 8,5–47,6	<u>30,9</u> 9,8–43,5	<u>7,9</u> 1,5–12,8	<u>89,2</u> 53,0–107,6
1991–1995 ^{4*}	<u>7,40</u> 6,90–7,62	<u>5,1</u> 1,0–15,0	<u>1,1</u> 0,5–2,4	<u>20,0</u> 6,6–37,6	<u>3,2</u> 1,4–10,9	<u>24,2</u> 17,3–70,5	<u>27,4</u> 3,3–71,0	<u>6,7</u> 1,7–13,4	<u>87,4</u> 33,5–200,6
1996–1998 ^{4*}	<u>7,35</u> 7,26–7,51	<u>4,4</u> 4,0–4,7	<u>1,1</u> 1,0–1,2	<u>15,7</u> 13,3–16,5	<u>2,7</u> 2,2–3,6	<u>23,0</u> 20,7–25,2	<u>23,5</u> 21,7–24,6	<u>5,6</u> 4,5–5,9	<u>77,1</u> 68,1–79,3
2001–2006	<u>7,48</u> 6,83–7,89	<u>4,1</u> 1,5–6,0	<u>1,0</u> 0,3–1,3	<u>17,0</u> 9,6–32,0	<u>3,3</u> 2,4–9,5	<u>26,5</u> 20,0–45,2	<u>25,3</u> 6,1–61,6	<u>5,1</u> 4,0–5,9	<u>83,3</u> 45,7–159,3
2009–2018	<u>7,40</u> 7,03–8,74	<u>4,3</u> 3,7–5,8	<u>1,0</u> 0,6–1,1	<u>17,3</u> 14,4–22,9	<u>3,3</u> 2,7–7,5	<u>26,7</u> 21,4–48,0	<u>22,7</u> 19,5–45,1	<u>6,2</u> 3,7–6,8	<u>81,5</u> 69,9–111,8

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
Большая Имандра (центральная акватория плеса)									
1974–1975 ^{1*}	<u>7,53</u> 6,86–7,75	–	–	–	–	–	<u>6,4</u> 2,8–16,0	–	–
1978–1979 ^{2*}	<u>7,70</u> 7,10–8,40	–	–	<u>14,7</u> 14,5–14,8	<u>4,1</u> 3,8–4,3	–	<u>11,3</u> 7,0–16,7	<u>2,5</u> 2,0–3,0	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,30</u> 6,40–8,10	<u>4,4</u> 3,6–4,8	<u>2,6</u> 2,0–2,9	<u>16,2</u> 15,0–18,7	<u>3,0</u> 2,3–3,5	<u>16,5</u> 14,6–23,2	<u>32,4</u> 22,2–47,9	<u>7,5</u> 4,0–8,4	<u>82,3</u> 47,5–98,3
1991–1995 ^{4*}	<u>7,29</u> 6,73–7,48	<u>4,4</u> 2,1–6,1	<u>1,2</u> 0,5–1,4	<u>18,2</u> 8,3–23,3	<u>2,6</u> 1,6–5,0	<u>21,1</u> 11,2–45,6	<u>29,0</u> 17,2–38,2	<u>7,4</u> 5,0–9,6	<u>84,5</u> 45,9–113,8
1996–1998 ^{4*}	<u>7,20</u> 6,93–7,49	<u>4,0</u> 3,2–4,5	<u>1,2</u> 1,0–1,3	<u>13,9</u> 12,8–16,6	<u>2,6</u> 1,5–3,2	<u>19,7</u> 16,4–21,4	<u>22,6</u> 19,7–26,0	<u>5,1</u> 4,4–5,7	<u>68,3</u> 59,7–76,5
2001–2006	<u>7,34</u> 7,24–7,47	<u>3,7</u> 3,5–3,9	<u>1,1</u> 1,0–1,2	<u>15,6</u> 12,3–17,2	<u>2,4</u> 1,9–2,9	<u>21,9</u> 18,8–23,6	<u>25,2</u> 19,7–28,7	<u>5,1</u> 4,3–5,3	<u>75,2</u> 61,6–81,7
2009–2018	<u>7,34</u> 7,30–7,56	<u>4,0</u> 3,5–4,1	<u>1,1</u> 1,0–1,1	<u>15,7</u> 10,0–17,0	<u>2,6</u> 2,1–3,0	<u>23,4</u> 19,0–25,7	<u>21,5</u> 15,3–23,4	<u>6,5</u> 3,9–7,9	<u>74,8</u> 54,9–79,0
Большая Имандра (южная акватория плеса)									
1974–1975 ^{1*}	<u>7,20</u> 6,94–7,61	–	–	–	–	–	<u>8,4</u> 5,3–17,2	–	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,43</u> 7,10–7,91	<u>4,9</u> 4,0–6,7	<u>1,1</u> 1,0–2,4	<u>18,6</u> 14,3–48,0	<u>3,3</u> 2,6–4,2	<u>22,8</u> 16,8–25,6	<u>29,6</u> 20,6–39,0	<u>7,2</u> 1,1–9,1	<u>88,0</u> 60,3–116,3
1991–1995 ^{4*}	<u>7,20</u> 6,80–7,57	<u>5,1</u> 3,8–6,1	<u>1,1</u> 1,0–1,2	<u>18,0</u> 14,1–23,4	<u>3,0</u> 2,6–3,5	<u>23,7</u> 22,0–25,7	<u>30,4</u> 24,5–35,0	<u>7,2</u> 5,9–8,1	<u>88,0</u> 76,7–97,0
1996–1998 ^{4*}	<u>7,18</u> 7,00–7,50	<u>4,0</u> 3,8–4,3	<u>1,2</u> 1,0–1,3	<u>13,0</u> 7,6–16,2	<u>2,2</u> 1,5–2,7	<u>18,9</u> 17,6–21,5	<u>21,4</u> 12,1–24,0	<u>4,4</u> 2,9–5,7	<u>65,7</u> 47,0–75,1
2001–2006	<u>7,36</u> 7,28–7,52	<u>4,0</u> 3,7–4,1	<u>1,1</u> 1,0–1,2	<u>16,0</u> 14,3–17,4	<u>2,9</u> 2,4–3,2	<u>23,7</u> 22,8–25,3	<u>23,2</u> 22,5–27,3	<u>5,2</u> 4,5–5,4	<u>77,2</u> 72,1–81,3

Продолжение таблицы 6.1

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
2009–2018	<u>7,36</u> 7,22–7,69	<u>4,2</u> 3,7–4,2	<u>1,0</u> 1,0–1,1	<u>15,9</u> 14,3–17,3	<u>2,8</u> 2,8–3,0	<u>24,7</u> 24,1–25,8	<u>21,7</u> 19,6–23,4	<u>6,3</u> 4,9–7,5	<u>76,6</u> 71,6–80,9
Йокостровская Имандра (восточная акватория)									
1974–1975 ^{1*}	<u>6,98</u> 6,80–7,10	–	–	<u>12,3</u> 10,0–13,3	<u>3,7</u> 2,5–4,9	–	<u>10,8</u> 2,4–20,6	–	–
1978–1979 ^{2*}	<u>7,10</u> 6,50–7,40	–	–	<u>12,3</u> 10,7–12,6	<u>2,9</u> 2,6–4,1	–	<u>9,0</u> 6,3–14,4	<u>2,5</u> 1,5–4,0	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,61</u> 7,01–7,75	<u>6,2</u> 4,2–6,7	<u>1,2</u> 1,1–1,5	<u>18,7</u> 15,4–22,3	<u>3,5</u> 2,8–3,6	<u>24,2</u> 22,0–39,6	<u>30,5</u> 25,7–40,6	<u>7,5</u> 7,0–7,5	<u>91,1</u> 78,9–121,7
1991–1995 ^{4*}	<u>7,41</u> 7,28–7,62	<u>5,4</u> 3,8–7,5	<u>1,1</u> 0,9–1,3	<u>15,5</u> 10,3–24,4	<u>2,6</u> 2,3–3,3	<u>23,6</u> 21,2–28,1	<u>22,0</u> 21,2–31,2	<u>5,8</u> 5,4–7,0	<u>77,3</u> 69,9–98,9
1996–1998 ^{4*}	<u>7,16</u> 6,98–7,27	<u>4,2</u> 4,1–4,7	<u>1,0</u> 0,9–1,2	<u>12,9</u> 12,4–13,3	<u>2,6</u> 2,6–2,7	<u>21,0</u> 20,4–21,6	<u>21,1</u> 18,9–22,2	<u>4,7</u> 4,1–5,1	<u>67,4</u> 63,5–70,8
2001–2006	<u>7,41</u> 7,34–7,47	<u>3,9</u> 3,9–4,0	<u>1,1</u> 1,1–1,1	<u>12,2</u> 12,0–12,4	<u>2,3</u> 2,2–2,3	<u>20,5</u> 20,3–20,7	<u>19,5</u> 19,3–19,6	<u>4,0</u> 4,0–4,1	<u>63,4</u> 63,3–63,5
2009–2018	<u>7,32</u> 7,24–7,52	<u>4,2</u> 4,0–6,7	<u>1,0</u> 1,0–1,5	<u>13,4</u> 11,5–14,3	<u>2,6</u> 2,5–2,8	<u>23,8</u> 22,8–31,6	<u>18,7</u> 17,0–19,3	<u>5,2</u> 4,6–5,3	<u>68,9</u> 65,5–76,0
Йокостровская Имандра (центральная акватория)									
1974–1975 ^{1*}	<u>6,90</u> 6,50–7,15	–	–	<u>12,3</u> 7,4–13,9	<u>4,1</u> 2,8–4,7	–	<u>9,6</u> 4,0–36,0	–	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,20</u> 6,20–7,76	<u>4,9</u> 0,8–5,6	<u>1,2</u> 0,7–2,7	<u>19,0</u> 13,1–47,5	<u>3,3</u> 2,8–3,5	<u>23,2</u> 14,6–25,6	<u>23,0</u> 1,9–29,8	<u>6,3</u> 1,3–8,5	<u>85,0</u> 71,4–107,4
1991–1995 ^{4*}	<u>7,22</u> 6,40–8,28	<u>4,6</u> 2,5–6,0	<u>1,1</u> 0,7–1,4	<u>16,0</u> 9,6–22,3	<u>2,8</u> 1,8–3,8	<u>22,3</u> 15,3–27,8	<u>26,2</u> 17,2–35,2	<u>6,4</u> 4,3–9,6	<u>79,6</u> 52,8–97,5
1996–1998 ^{4*}	<u>7,25</u> 6,67–7,73	<u>4,5</u> 3,6–5,5	<u>1,1</u> 0,9–1,4	<u>13,6</u> 12,0–17,8	<u>2,6</u> 0,3–3,3	<u>21,1</u> 17,0–36,9	<u>22,7</u> 19,5–28,2	<u>5,5</u> 4,2–7,4	<u>71,2</u> 60,4–86,7

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
2001–2006	<u>7,29</u> 4,78–8,82	<u>3,9</u> 3,6–4,4	<u>1,1</u> 0,9–1,3	<u>15,0</u> 11,3–18,6	<u>2,7</u> 2,2–3,2	<u>23,9</u> 19,8–25,7	<u>22,0</u> 18,1–31,8	<u>4,9</u> 3,9–6,3	<u>73,4</u> 60,0–88,2
2009–2018	<u>7,32</u> 6,92–8,88	<u>4,0</u> 3,6–4,4	<u>1,0</u> 0,9–1,2	<u>14,0</u> 12,4–17,5	<u>2,7</u> 2,0–3,8	<u>23,7</u> 21,8–27,9	<u>19,3</u> 17,5–25,0	<u>5,3</u> 4,1–6,5	<u>70,2</u> 65,2–85,1
Йокостровская Имандра (западная акватория)									
1974–1975 ^{1*}	6,90	–	–	–	–	–	4,0	–	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,37</u> 6,80–7,54	<u>5,1</u> 3,6–5,4	<u>1,4</u> 1,1–2,9	<u>18,5</u> 10,6–25,8	<u>2,8</u> 2,4–3,1	<u>19,5</u> 13,4–22,3	<u>19,8</u> 18,2–21,7	<u>6,7</u> 5,2–8,7	<u>62,6</u> 60,3–64,6
1991–1995 ^{4*}	<u>7,31</u> 6,85–7,46	<u>4,1</u> 3,2–5,2	<u>1,1</u> 0,9–1,1	<u>13,9</u> 8,5–18,5	<u>2,5</u> 1,3–3,0	<u>20,9</u> 18,7–21,8	<u>22,5</u> 14,4–29,4	<u>5,4</u> 3,5–6,7	<u>69,2</u> 52,1–82,9
1996–1998 ^{4*}	<u>7,23</u> 7,15–7,29	<u>4,0</u> 3,8–4,2	<u>1,0</u> 0,9–1,2	<u>12,5</u> 11,4–13,6	<u>2,3</u> 1,9–2,6	<u>19,2</u> 18,4–21,7	<u>19,3</u> 16,9–21,7	<u>4,3</u> 3,6–5,1	<u>62,8</u> 54,5–68,1
2001–2006	<u>7,36</u> 7,15–7,44	<u>3,7</u> 3,4–3,8	<u>1,0</u> 1,0–1,1	<u>11,7</u> 8,3–14,8	<u>2,1</u> 1,6–2,6	<u>21,1</u> 17,0–22,9	<u>17,4</u> 13,3–22,7	<u>4,0</u> 2,8–4,4	<u>59,8</u> 47,4–71,6
2009–2018	<u>7,29</u> 7,36–7,44	<u>3,9</u> 3,7–4,0	<u>1,0</u> 1,0–1,3	<u>12,6</u> 8,9–13,0	<u>2,9</u> 1,9–2,7	<u>22,6</u> 19,6–23,0	<u>18,3</u> 13,5–18,8	<u>4,9</u> 3,2–4,8	<u>65,8</u> 52,0–66,7
Йокостровская Имандра (губа Зашеечная)									
1974–1975 ^{1*}	<u>6,70</u> 6,30–6,80	–	–	–	–	–	–	–	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,00</u> 6,80–7,42	<u>3,6</u> 3,2–4,4	<u>2,1</u> 0,8–2,4	<u>7,7</u> 5,0–9,5	<u>1,8</u> 1,2–2,2	<u>20,7</u> 17,1–23,2	<u>16,1</u> 11,5–20,5	<u>3,5</u> 1,0–4,6	<u>57,9</u> 42,6–60,6
1991–1995 ^{4*}	<u>7,20</u> 6,84–7,38	<u>3,7</u> 2,9–4,7	<u>1,1</u> 0,7–1,3	<u>9,0</u> 4,6–11,9	<u>1,6</u> 1,1–2,5	<u>18,6</u> 16,6–20,5	<u>14,0</u> 7,5–22,8	<u>3,8</u> 2,1–5,1	<u>50,8</u> 41,2–65,8
1996–1998 ^{4*}	<u>7,14</u> 6,91–7,37	<u>3,6</u> 3,5–3,9	<u>1,1</u> 1,0–1,3	<u>7,7</u> 7,0–8,6	<u>1,6</u> 1,4–2,0	<u>17,5</u> 14,0–17,9	<u>13,4</u> 12,4–14,0	<u>2,9</u> 2,8–3,3	<u>48,2</u> 43,1–49,4

Продолжение таблицы 6.1

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
2001–2006	<u>7,34</u> 7,24–7,40	<u>3,3</u> 3,2–3,5	<u>1,1</u> 1,0–1,1	<u>7,0</u> 6,7–7,1	<u>1,5</u> 1,5–1,5	<u>16,6</u> 16,5–16,7	<u>12,0</u> 11,5–12,4	<u>2,4</u> 2,4–2,5	<u>43,7</u> 43,4–44,3
2009–2018	<u>7,21</u> 7,05–7,47	<u>3,6</u> 3,3–4,1	<u>1,1</u> 1,0–1,3	<u>8,4</u> 5,6–12,0	<u>1,7</u> 1,4–2,5	<u>19,5</u> 17,0–21,9	<u>12,6</u> 9,0–17,7	<u>3,2</u> 1,8–4,4	<u>50,2</u> 41,6–63,4
Бабинская Имандра (губа Молочная)									
1974–1975 ^{1*}	<u>6,75</u> 6,60–6,90	–	–	<u>3,1</u> 2,6–3,6	<u>2,1</u> 0,6–5,6	–	<u>1,6</u> 0,8–7,4	–	–
1978–1979 ^{2*}	<u>7,00</u> 6,90–7,20	–	–	<u>4,6</u> 1,6–7,1	<u>1,3</u> 0,8–1,7	–	<u>3,2</u> 1,4–8,5	<u>0,8</u> 0,5–1,5	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,10</u> 6,30–7,65	<u>3,6</u> 1,4–4,4	<u>2,0</u> 0,6–2,7	<u>6,1</u> 4,1–9,8	<u>1,4</u> 0,8–2,3	<u>17,1</u> 11,0–23,2	<u>13,8</u> 6,3–24,5	<u>2,0</u> 0,1–5,0	<u>46,5</u> 34,7–65,3
1991–1995 ^{4*}	<u>7,25</u> 6,94–7,44	<u>3,8</u> 2,3–4,4	<u>1,0</u> 0,7–1,2	<u>7,4</u> 4,5–11,7	<u>1,3</u> 0,9–2,0	<u>17,3</u> 15,9–21,6	<u>11,9</u> 9,6–16,2	<u>3,0</u> 2,5–4,2	<u>45,1</u> 40,2–55,8
1996–1998 ^{4*}	<u>7,11</u> 6,89–7,39	<u>3,7</u> 3,4–3,9	<u>1,2</u> 0,9–1,2	<u>7,4</u> 6,4–8,4	<u>1,5</u> 1,3–1,7	<u>17,0</u> 15,8–19,0	<u>12,1</u> 10,2–13,9	<u>2,9</u> 2,3–3,5	<u>45,3</u> 40,3–51,6
2001–2006	<u>7,28</u> 7,21–7,31	<u>3,4</u> 3,2–3,7	<u>1,1</u> 1,0–1,1	<u>6,8</u> 5,3–8,5	<u>1,5</u> 1,3–1,7	<u>17,8</u> 15,5–19,0	<u>10,7</u> 9,7–13,7	<u>2,3</u> 1,8–2,9	<u>43,9</u> 37,9–49,4
2009–2018	<u>7,29</u> 7,12–7,41	<u>3,6</u> 3,3–3,7	<u>1,1</u> 1,0–1,3	<u>7,1</u> 5,7–7,8	<u>1,5</u> 1,3–1,5	<u>18,5</u> 16,7–19,7	<u>10,8</u> 9,2–11,2	<u>2,6</u> 2,1–2,8	<u>45,4</u> 40,0–47,7
Бабинская Имандра (восточная акватория)									
1974–1975 ^{1*}	<u>6,70</u> 6,60–6,90	–	–	<u>3,2</u> 3,0–3,3	<u>1,6</u> 1,5–1,7	–	<u>3,6</u> 1,2–4,8	–	–
1978–1979 ^{2*}	<u>7,05</u> 9,80–7,10	–	–	<u>4,6</u> 4,4–6,8	<u>1,5</u> 1,3–1,5	–	<u>3,2</u> 2,7–8,6	<u>0,5</u> 0,5–1,5	–
1981–1986 ^{3*}	<u>7,14</u> 6,60–7,70	<u>3,6</u> 2,8–4,2	<u>1,9</u> 0,9–2,4	<u>5,9</u> 4,7–9,4	<u>1,3</u> 0,5–1,8	<u>19,5</u> 12,2–26,8	<u>13,1</u> 1,5–16,2	<u>3,0</u> 1,0–6,7	<u>47,3</u> 32,3–55,6

Период, годы	pH	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Na, мг/л	K, мг/л	HCO ₃ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Cl, мг/л	Σ ионов, мг/л
1991–1995 ^{4*}	<u>7,23</u> 6,44–7,61	<u>4,0</u> 2,7–5,0	<u>1,0</u> 0,7–1,2	<u>7,1</u> 2,0–11,7	<u>1,4</u> 0,8–2,9	<u>17,3</u> 8,3–20,0	<u>12,0</u> 5,3–16,5	<u>2,9</u> 1,1–7,3	<u>45,3</u> 31,3–56,9
1996–1998 ^{4*}	<u>7,16</u> 6,96–7,28	<u>3,5</u> 3,4–3,7	<u>1,1</u> 1,0–1,2	<u>6,7</u> 5,7–7,7	<u>1,4</u> 1,3–1,5	<u>16,2</u> 15,7–17,1	<u>11,3</u> 10,2–12,3	<u>2,7</u> 2,3–3,0	<u>43,1</u> 39,7–46,6
2001–2006	<u>7,27</u> 7,20–7,34	<u>3,3</u> 2,9–3,5	<u>1,0</u> 0,9–1,1	<u>5,9</u> 5,2–6,6	<u>1,3</u> 1,3–1,5	<u>16,5</u> 15,1–17,7	<u>9,7</u> 8,6–10,7	<u>2,1</u> 1,8–2,5	<u>40,3</u> 35,8–42,7
2009–2018	<u>7,24</u> 6,99–7,54	<u>3,5</u> 3,2–3,7	<u>1,1</u> 1,0–1,2	<u>6,3</u> 5,1–7,5	<u>1,4</u> 1,2–1,7	<u>17,7</u> 16,1–19,2	<u>9,4</u> 8,3–11,5	<u>2,3</u> 1,9–2,7	<u>41,6</u> 37,5–47,2
Бабинская Имандра (западная акватория)									
1974–1975 ^{1*}	<u>7,10</u> 7,10–7,10	–	–	<u>4,2</u> 4,1–4,6	<u>1,5</u> 1,2–2,0	–	<u>4,1</u> 1,8–10,8	<u>1,0</u> 1,0–1,0	–
1981–1986 ^{2*}	<u>7,10</u> 6,80–7,42	<u>3,6</u> 2,8–4,1	<u>1,5</u> 1,0–2,4	<u>5,3</u> 4,4–7,1	<u>1,3</u> 1,1–1,7	<u>16,9</u> 14,6–20,7	<u>13,2</u> 7,9–16,0	<u>3,2</u> 1,0–3,9	<u>43,2</u> 33,8–49,3
1991–1995 ^{4*}	<u>7,22</u> 6,74–7,39	<u>3,0</u> 2,7–4,3	<u>1,0</u> 0,7–1,1	<u>6,3</u> 5,0–7,8	<u>1,3</u> 0,9–1,6	<u>16,2</u> 14,6–18,0	<u>10,7</u> 9,0–13,5	<u>2,8</u> 2,3–3,5	<u>41,3</u> 36,0–48,4
1996–1998 ^{4*}	<u>7,14</u> 7,06–7,30	<u>3,3</u> 3,2–3,9	<u>1,0</u> 0,9–1,1	<u>5,5</u> 5,2–6,4	<u>1,2</u> 1,2–1,3	<u>14,9</u> 14,2–16,0	<u>9,5</u> 8,5–10,8	<u>2,2</u> 2,0–2,5	<u>37,7</u> 35,8–41,9
2001–2006	<u>7,30</u> 7,15–7,36	<u>3,2</u> 2,8–3,3	<u>1,0</u> 0,9–1,1	<u>4,8</u> 4,6–6,3	<u>1,2</u> 1,2–1,4	<u>14,8</u> 14,5–17,7	<u>8,4</u> 7,5–9,7	<u>1,7</u> 1,6–2,3	<u>34,9</u> 33,5–41,6
2009–2018	<u>7,22</u> 7,15–7,44	<u>3,6</u> 3,1–3,5	<u>1,0</u> 1,0–1,1	<u>5,7</u> 4,9–6,1	<u>1,2</u> 1,2–1,4	<u>17,4</u> 15,5–17,6	<u>8,9</u> 8,0–9,6	<u>2,1</u> 1,8–2,2	<u>39,9</u> 35,3–40,6

Примечания: *1 — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976; *2 — Моисеенко, Яковлев, 1990; *3 — Крючков и др., 1985); *4 — Антропогенные модификации..., 2002).

В таких условиях формировались воды с низкой минерализацией, гидрокарбонатного класса, группы кальция или натрия — в зависимости от химического состава рек Хибинского горного массива в восточной части водосборного бассейна оз. Имандра, а в северо-западной части озера — рек Нявка-, Монче- и Чуна-тундр. Все реки Хибинского массива (Печа, Куна, Гольцовка, Мал. Белая), впадающие в плес Большая Имандра, относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу, реки Монче, Вите и Куркенйок, впадающие в плес Большая Имандра, а также Чуна и Пиренга, впадающие в Йокостровскую Имандру, относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу.

В конце 1960-х — начале 1970-х гг. минерализация воды в плесе Большая Имандра изменялась в интервале 28–62 мг/л, в среднем по плесу — 45 мг/л. Наименьшие величины минерализации — 27 и 39 мг/л отмечались в губах Вите и Кислая, наибольшие — 47–62 мг/л — в губе Монче, между островами Высокий и Сяв, в губе Белой и в районе острова Серво. Состав воды — «чаще гидрокарбонатно-натриевый» [цит по: (Комплексное изучение..., 1972)]. На втором месте среди анионов сульфаты (от 0 до 29 мг/л, в среднем — 6,6 мг/л), среди катионов — кальций.

Средняя минерализация воды плеса Йокостровская Имандра, рассчитанная по посту Зашеек за многолетний период наблюдений (1949–1966 гг.), была равна 27,7 мг/л и характеризовала водоем как ультрапресный (Ресурсы..., 1970). По соотношению главных ионов вода данного плеса относилась к гидрокарбонатно-кальциевому типу, но уже к 1973–1974 гг. эти воды перешли к гидрокарбонатно-натриевому типу. В этот период минерализация воды в среднем по плесу — 33 мг/л, содержание сульфатов не превысило 14 мг/л (14–17 % от общего содержания анионов), на долю натрия приходилось 39–41 % от общего содержания катионов (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976).

В плесе Бабинская Имандра вода «сохраняется в природном или близком к нему состоянии» [цит по: (Комплексное изучение..., 1972)], то есть относится к гидрокарбонатному (от 89 до 93 %-экв) классу, группе кальция (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). Минерализация в среднем по плесу составляла 22 мг/л. Вода Бабинской Имандры, как наиболее удаленного от источников загрязнения плеса, еще долго сохраняла природный ионный состав воды (с преобладанием в катионном составе кальция), но уже с первым поступлением подогретых вод КАЭС, забираемых из Йокостровской Имандры, ситуация изменилась и здесь также стал преобладать натрий, это отмечается и в современный период исследований (см. табл. 6.1).

Для начала 1980-х гг. был характерен быстрый рост минерализации, что соответствовало пику промышленной активности в регионе, с последующим постепенным снижением, обусловленным падением производства (рис. 6.1). В период нарастания техногенной нагрузки на озеро в 1983–1992 гг. среднее значение минерализации воды в плесе Большая Имандра достигало 87 мг/л, в Йокостровской оно составило 75 мг/л, в Бабинской — 48 мг/л.

В 1993–1998 гг. (период снижения объемов промышленного производства) эта величина в Большой Имандре снизилась до 72 мг/л, в Йокостровской — до 66 мг/л, в Бабинской — до 45 мг/л (Антропогенные..., 2002).

В настоящее время устойчивая динамика снижения минерализации воды, по сравнению с периодом максимального воздействия промышленных стоков на озеро (1980–1990-е гг.), сохраняется во всех плесах оз. Имандра. Исследования 2010–2018 гг. показали, что в плесе Большая Имандра сохраняются высокие

значения минерализации воды. Сумма ионов изменяется от 50 до 81 мг/л в зависимости от района (Павлова и др., 2021). В плесе Йокостровская Имандра в период 2000–2018 гг. наиболее высокая минерализация воды — 70–73 мг/л наблюдалась в центральной части северного плеса (район Йокостровского пролива, острова Йок, мониторинговой станции и острова Кумужий). В районе пролива Заячья Салма и острова Нестеров минерализация воды снижается до 60–65 мг/л. В южной части плеса Йокостровская Имандра эта величина составляет 44–49 мг/л. Показатели минерализации воды в плесе Бабинская Имандра изменяются от 35–39 (губы Кунчаст, Пасма, Уполокша) до 42–44 мг/л в губе Молочной.

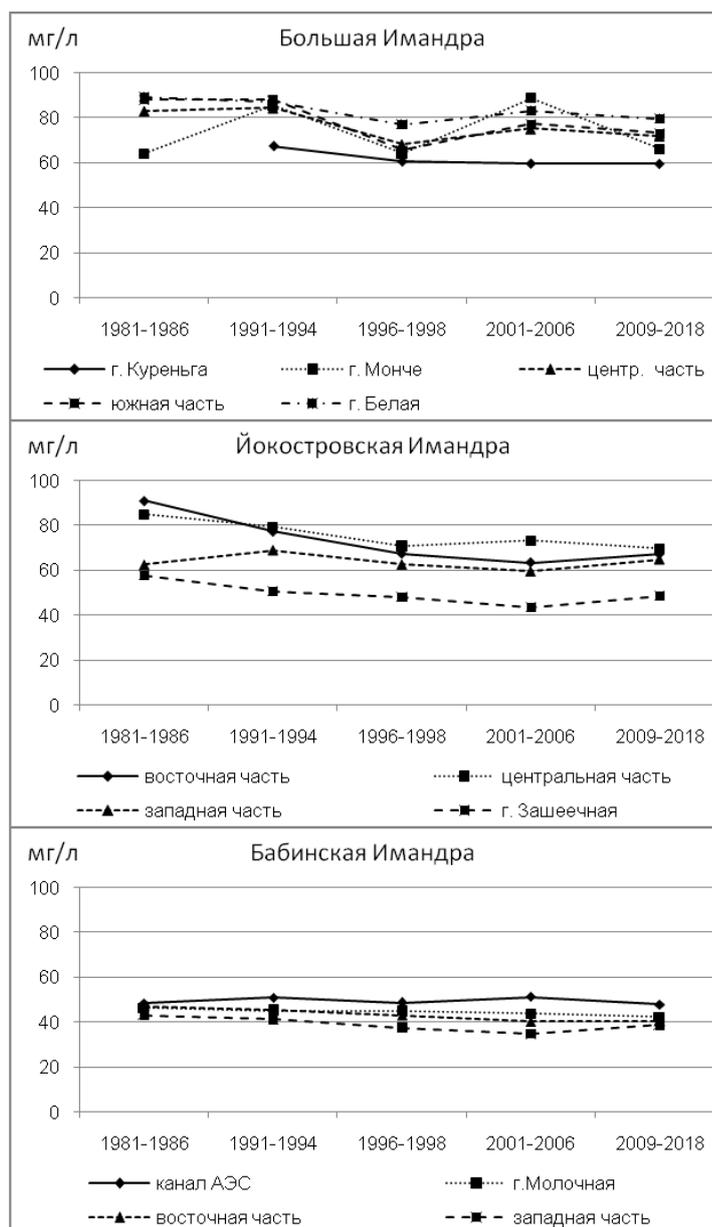


Рис. 6.1. Динамика общей минерализации в плесах оз. Имандра

6.2. Соотношение ионов

С середины 1970-х гг. содержание сульфатов в анионном составе всех исследуемых плесов и районов озера резко нарастало за счет влияния сточных вод комбината «Североникель» и аэротехногенного переноса, и к концу 1980-х гг. оно составляло в среднем 31 мг/л — в Большой Имандре, 17 мг/л — в Йокостровской и 15 мг/л — в Бабинской.

Если в 1984–1985 гг., в период максимальных концентраций сульфатов в Имандре, среднегодовое содержание гидрокарбонатных ионов в южной части озера превышало таковое для сульфатных на 3,7 мг/л, то уже к 2018 г. разница была более значимой: в Большой Имандре в анионном составе превышение гидрокарбонатов в среднем составляло 3,3 мкг/л, в Йокостровской — 4,7 мг/л, в Бабинской — 7,8 мг/л.

С середины 1990-х гг. количество сульфатов стало постепенно снижаться, и к настоящему времени их содержание в плесах Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра в среднем составляет 18,9, 17,2 и 9,4 мг/л соответственно. Среднее содержание гидрокарбонатов для плесов Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра сейчас составляет 22,2, 21,9 и 17,1 мг/л соответственно.

Помимо продолжающейся тенденции к снижению минерализации воды оз. Имандра, в настоящее время происходит изменение соотношений между ионами (табл. 6.2).

В период исследований 1980–1990-х гг. в воде плеса Большая Имандра преобладающим анионом стабильно являлся сульфат-ион, на долю которого в ионном составе приходилось 55–62 % от общего содержания анионов. Доля гидрокарбонатного иона составляла 29–42 %. Среди катионов преобладал натрий (58–66 % от общего содержания катионов) (Антропогенные..., 2002). Таким образом, вода этого плеса, по классификации О. А. Алекина, относилась к сульфатному классу, группе натрия. В настоящее время доля сульфат-иона в воде плеса снизилась до 42–45 %, а гидрокарбонатов возросла до 40–44 %, доля натрия составляет 58–65 %. Таким образом, воду плеса нельзя однозначно отнести к определенному классу. По соотношению анионов она занимает промежуточное положение между сульфатным и гидрокарбонатным классами.

В Монче-губе преобладающим анионом остается сульфат-ион — 47 % от общего содержания анионов, доля гидрокарбонатного иона — 37 %. В наиболее чистом районе — губа Вите — это соотношение 42 и 43 % соответственно.

В 1990-е гг. в Йокостровской Имандре среди анионов также преобладали сульфаты — 49 %, доля гидрокарбонатов составляла 36 %, среди катионов доминировал натрий. В настоящее время в центральной части северного плеса Йокостровской Имандры доли сульфатного и гидрокарбонатного ионов составляют 44–48 и 36–45 % соответственно, то есть незначительно выражено преобладание сульфат-иона.

В западной части северного плеса Йокостровской Имандры (остров Нестеров, пролив Заячья Салма) доля сульфатов составляет 41–44 % от общего содержания анионов, гидрокарбонатов — 41–46 %, то есть эти анионы занимают равное положение в ионном составе воды. Преобладающим катионом является натрий — 54–66 % от общего содержания катионов. В южной части плеса среди анионов на первое место выходит гидрокарбонатный ион. В ионном составе воды его доля — 42–57 %, сульфат-иона — 34–44 %. На долю натрия приходится 42–60 % от общего содержания катионов.

Таблица 6.2

Ионный состав воды озера Имандра

Район	Сумма ионов, г/л	Состав
1991–1994 гг.		
Большая Имандра (губа Монче)	0,085	<u>SO₄(57)HCO₃(26)Cl(17)</u> Na(69)Ca(17)Mg(10)K(3)
Большая Имандра (губа Белая)	0,087	<u>SO₄(48)HCO₃(35)Cl(16)</u> Na(65)Ca(20)Mg(7)K(8)
Большая Имандра	0,072	<u>SO₄(49)HCO₃(34)Cl(17)</u> Na(65)Ca(20)Mg(9)K(6)
Йокостровская Имандра (северный плес)	0,075	<u>SO₄(49)HCO₃(35)Cl(16)</u> Na(64)Ca(22)Mg(9)K(6)
Йокостровская Имандра (южный плес)	0,051	<u>HCO₃(43)SO₄(41)Cl(15)</u> Na(56)Ca(25)Mg(9)K(6)
Бабинская Имандра	0,044	<u>HCO₃(46)SO₄(40)Cl(14)</u> Na(52)Ca(29)Mg(13)K(5)
2009–2018 гг.		
Большая Имандра (губа Монче)	0,066	<u>SO₄(47)HCO₃(34)Cl(20)</u> Na(65)Ca(19)Mg(10)K(5)
Большая Имандра (губа Белая)	0,079	<u>SO₄(44)HCO₃(42)Cl(15)</u> Na(65)Ca(19)Mg(7)K(8)
Большая Имандра	0,064	<u>SO₄(43)HCO₃(41)Cl(16)</u> Na(61)Ca(22)Mg(10)K(7)
Йокостровская Имандра (северный плес)	0,067	<u>SO₄(43)HCO₃(42)Cl(15)</u> Na(62)Ca(22)Mg(9)K(7)
Йокостровская Имандра (южный плес)	0,049	<u>HCO₃(48)SO₄(40)Cl(13)</u> Na(56)Ca(27)Mg(14)K(7)
Бабинская Имандра	0,040	<u>HCO₃(52)SO₄(37)Cl(11)</u> Na(46)Ca(32)Mg(16)K(6)

В воде плеса Бабинская Имандра на протяжении всего периода исследований доминирующим анионом оставался гидрокарбонатный ион (Моисеенко, Яковлев, 1990; Антропогенные..., 2002). В 2010–2018 гг. на его долю в ионном составе воды приходилось 49–55 %, на долю сульфат-иона — 35–38 %. Преобладающий катион — натрий (43–51 %).

В ионном составе на кальций приходится 19–23 % в Большой Имандре, 21–27 % — в Йокостровской и 31–33 % — в Бабинской. Таким образом, по мере удаления от источников загрязнения в ионном составе воды доля натрия снижается и увеличивается доля кальция, тем не менее натрий остается доминирующим катионом на всей акватории оз.Имандра.

Пространственная изменчивость основных ионов минерализации (натрия, кальция, гидрокарбонатных и сульфат-ионов) в настоящее время характеризуется разбросанностью их концентраций на акватории всех плесов оз. Имандра, что достоверно говорит о различии гидрохимического состава вод исследуемых плесов и позволяет выделить зону влияния загрязненных потоков и фоновую зону (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Содержание основных ионов минерализации в поверхностных водах оз. Имандра

Коэффициенты корреляции между минерализацией и данными компонентами также наиболее значимы. Содержание ионов натрия (Na^+) изменялось в пределах от 1,9 до 31,0 мг/л, ионов кальция (Ca^{2+}) — от 2,2 до 6,7 мг/л, ионов магния (Mg^{2+}) — от 0,6 до 2,2 мг/л, ионов калия (K^+) — от 0,5 до 7,5 мг/л, гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) — от 4,5 до 48,0 мг/л, сульфат-ионов (SO_4^{2-}) — от 4,2 до 47,2 мг/л, ионов хлора (Cl^-) — от 1,6 до 15,4 мг/л.

6.3. Сезонная динамика минерализации и ионного состава

Исследование сезонной динамики в весенний и летний периоды 2012 г. и вертикального распределения ионного состава воды проводилось в губах Монче, Белая и Молочная, как наиболее подверженных техногенному загрязнению.

Наиболее выражена как сезонная динамика минерализации, так и вертикальное распределение основных ионов в губе Монче (рис. 6.3), которая является приемником сточных вод комбината «Североникель». Точки 1–8 отбирались по направлению от впадения в губу реки Нюдауй к выходу из губы в оз. Имандра.

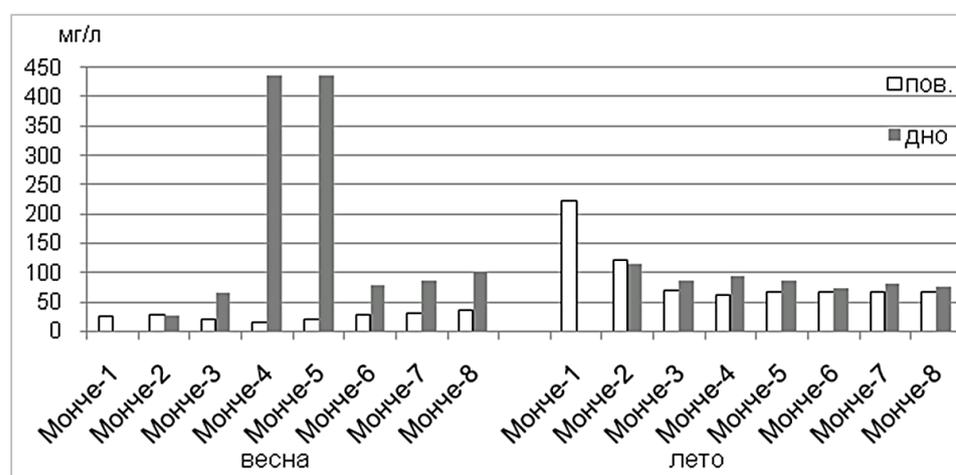


Рис. 6.3. Сезонная динамика общей минерализации в губе Монче

В зимний период (апрель 2009 г.) сумма ионов в воде Монче-губы изменялась от 16 до 35 мг/л в поверхностном слое и от 26 до 101 мг/л в придонном, при этом последнем отмечается нарастание минерализации по направлению к выходу из губы.

В летний период (август 2009 г.) в результате ветрового перемешивания воды вертикальное распределение ионов между поверхностным и придонным слоями менее выражено. Сумма ионов в это время в поверхностном слое воды составляет 61–68 мг/л, в придонном — 75–94 мг/л. В отличие от зимнего периода наблюдается некоторое снижение минерализации по направлению к выходу из губы.

Вертикальная стратификация в зимний период наиболее выражена для ионов натрия (2,8–4,3 мг/л в поверхностном слое и 2–25 мг/л в придонном)

и сульфатов (5–8 мг/л в поверхностном слое и 5–39 мг/л в придонном), что связано с распределением потока сточных вод в зимний гидрологический сезон, когда озеро находится подо льдом.

В августе 2009 г. содержание натрия в поверхностном слое изменялось от 13 до 15 мг/л, в придонном слое — от 16 до 28 мг/л, содержание сульфатов варьировало от 19 до 22 и от 24 до 32 мг/л соответственно. Более высокое содержание как сульфатов, так и натрия в летний период отмечается в точках, расположенных в непосредственной близости от устья реки Ньюдауй.

В губе Белой и сезонная динамика, и вертикальная стратификация выражены более слабо (рис. 6.4), чем в Монче-губе, из-за меньших размеров самой губы и более мощного объема сточных вод. Однако и здесь по всей толще воды отмечается более равномерное распределение ионов в летний период и увеличение их содержания в придонном слое в зимний период. Наиболее высокие значения минерализации наблюдались в период паводка (июнь 2011 г. — 82–99 мг/л, июнь 2012 г. — до 107 мг/л). В октябре-марте минерализация изменялась от 70 до 75 мг/л в поверхностном слое и от 83 до 88 мг/л в придонном.

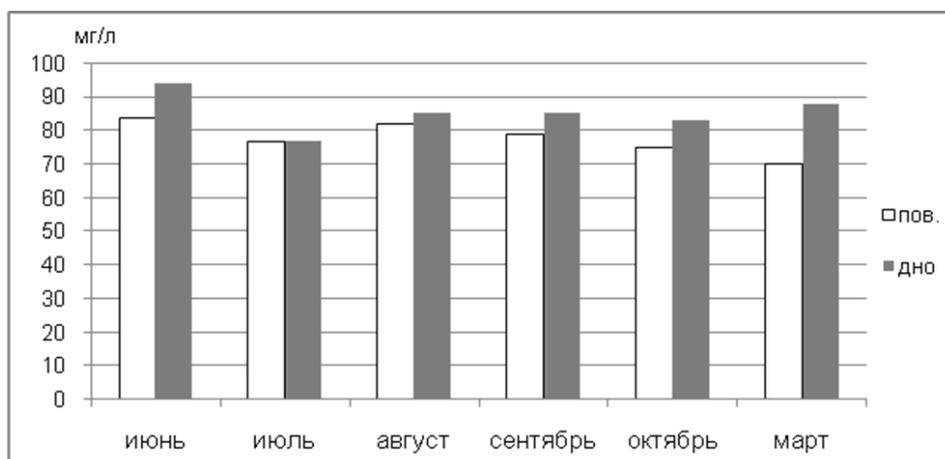


Рис. 6.4. Сезонная динамика общей минерализации в губе Белая

Сезонная динамика минерализации в губе Молочная (рис. 6.5) практически не выражена: сумма ионов изменяется в интервале 40–45 мг/л на протяжении всего периода наблюдений (апрель-октябрь 2011 г.). В отличие от рассмотренных районов Большой Иmandры, в губе Молочной в зимний период не наблюдается значительной разницы между содержанием основных ионов в поверхностном и придонном слоях, так как зимой губа не замерзает и сильные ветра перемешивают воды вместе с потоком теплых вод КАЭС. Однако в летний период содержание основных ионов в поверхностном слое увеличивается: сказывается влияние распространения более минерализованных потоков воды по каналу КАЭС из Йокостровской Иmandры.

К весеннему периоду ареал распространения всех сточных вод начинает увеличиваться быстрее, так как в оз. Иmandра в этот период, в связи со сработкой Нивских ГЭС, наблюдается самый низкий уровень воды и начинают преобладать

стоковые течения из Большой Имандры, которые являются важным элементом гидрологического режима водоема. К этому же времени увеличивается расход впадающих в озеро рек, несущих с собой талые воды с водосборной площади. Общее направление стоковых течений к южной части озера с увеличением их скорости в придонных слоях до 2,3 см/с (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976) говорит о возможности более быстрого замещения чистых природных вод хозяйственно-бытовыми стоками и стоками металлургических и горно-обогатительных предприятий.

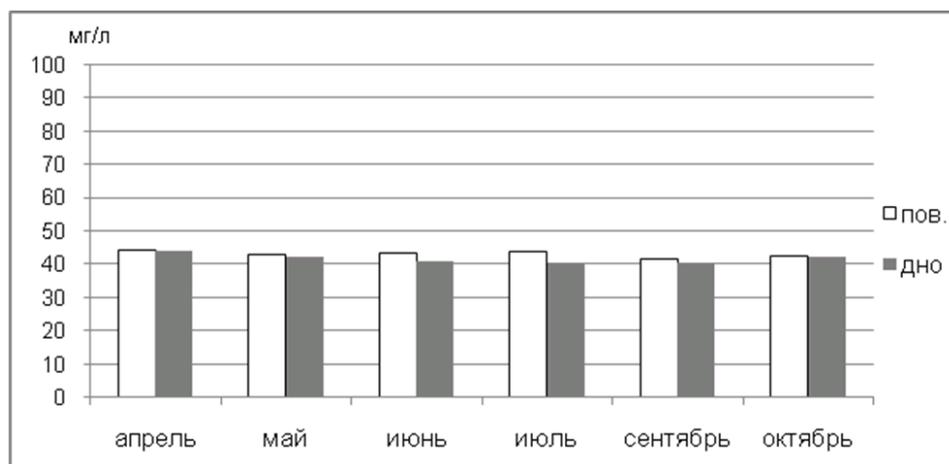


Рис. 6.5. Сезонная динамика общей минерализации в губе Молочная

Нашими исследованиями подтверждено, что наибольшие значения минерализации наблюдались в Большой Имандре — в губах Монче и Белая и Йокостровской Имандре на станциях с глубинами до 10 м, расположенных вдоль восточного берега губы Зашеечной, вдоль которого текут, вероятно, воды из Большой Имандры по направлению к единственному стоку из озера — реке Ниве. Воды с меньшей минерализацией в Йокостровской Имандре сосредоточены вдоль западного берега губы Зашеечной, в районе расположения водозабора Кольской АЭС, основу которых, вероятно, составляют воды из Бабинской Имандры, обогнувшие остров Роват (в настоящее время пересыпанный дамбой и превращенный в полуостров) и через пролив Широкая Салма обратно поступившие в Йокостровский плес. В период открытой водной поверхности начинают преобладать ветровые течения, часто меняющие свое направление, а стоковые течения имеют подчиненное значение и наблюдаются в основном в проливах между плесами (Сандимиров и др., 2017).

Таким образом, если в период более ранних исследований природные воды южной части оз. Имандра по ионному составу квалифицировали как маломинерализованные, то сейчас они характеризуются как воды умеренной минерализации. В настоящее время по содержанию основных ионов минерализации воды достоверно выраженные различия между плесами Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра отмечаются только по сульфатам и натрию. Правда, надо отметить, что и в Большой Имандре (губы Куреньга и Вите),

и в Йокостровской (южный плес) есть изолированные акватории, в которых общая минерализация соответствует минерализации, встречаемой в удаленных районах Бабинской Имандры.

6.4. Водородный показатель рН

Воды оз. Имандра до промышленного освоения Кольского полуострова относились к нейтральным: водородный показатель в чистых природных водах озера изменялся от 6,4 до 7,2. В период исследований 2011–2018 гг. наиболее высокие показатели рН — до 7,69–8,74 отмечались в губе Белой и южной части плеса Большая Имандра, куда поступают сточные воды АО «Апатит», а также городов Кировск и Апатиты (рис. 6.6). По мере удаления от загрязненных участков по ходу распространения значения рН потока снижаются, хотя и незначительно. Среднегодовые значения в 2011–2018 гг. для плесов озера составляли: для Большой Имандры — 7,35, Йокостровской — 7,39, Бабинской — 7,32. Более низкий показатель рН в Большой Имандре объясняется наличием относительно чистых изолированных губ на акватории плеса.

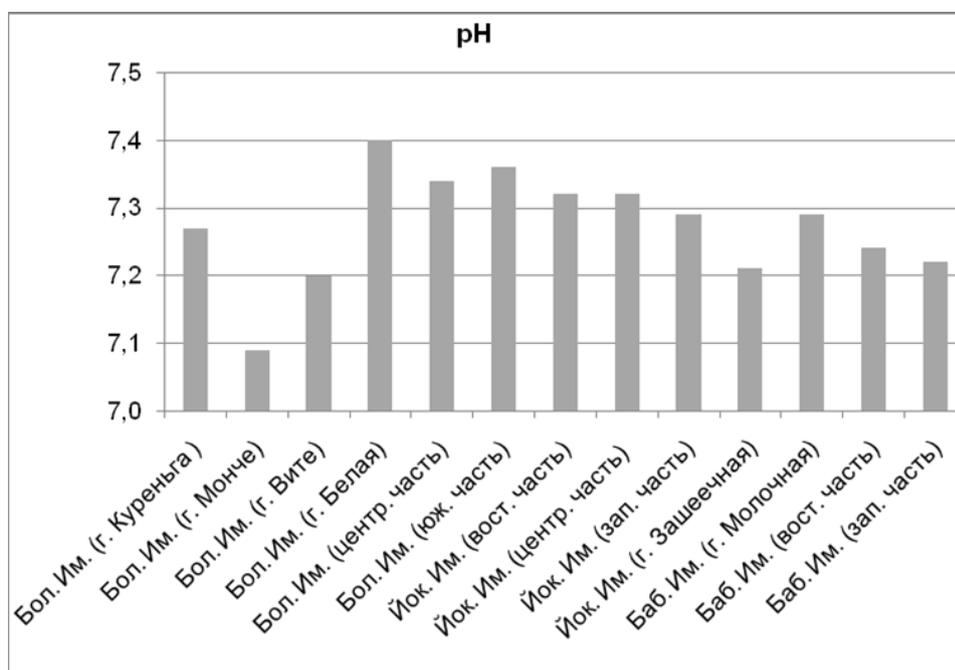


Рис. 6.6. Водородный показатель в поверхностных водах оз. Имандра

Сезонные изменения также незначительны, однако они имели четко выраженную направленность: повышение рН в летний период, и снижение — к осени. В вертикальном распределении водородного показателя прослеживается тенденция его снижения по направлению к глубинам, что обусловлено уменьшением температуры воды придонных слоев. Отсюда можно сделать вывод, что рН воды тесно связан с интенсивностью биохимических процессов в водной среде, которая, в свою очередь, зависит от температуры воды.

Таким образом, превышение среднегодовых значений рН, по сравнению с природным, незначительно, но тем не менее в настоящее время это почти одинаковые показатели уже для всей акватории оз. Имандра, вне зависимости от плесов. Существуют лишь локальные области, приуроченные к местам сброса сточных вод, где крайние значения увеличиваются в сторону подщелачивания воды. В большинстве случаев это отрицательно влияет на формирование качества воды, поскольку значительное отклонение рН среды от нейтральных значений приводит к сдвигам химических реакций с неблагоприятными последствиями для качества воды.

6.5. Органическое вещество

Органическое вещество присутствует в виде веществ гумусового происхождения и в виде продуктов распада различных органических веществ, преимущественно растительного происхождения. В озерной воде находится преимущественно в коллоидном состоянии, одна часть — в истинном растворе, другая — во взвешенном состоянии. Содержание органического вещества определялось по косвенным показателям — цветности и перманганатной окисляемости (ПО).

Общий органический углерод (ТОС) рассчитан на основе зависимости (Henriksen et al., 1992):

$$\text{ТОС} = 0,764\text{ПО} + 1,55.$$

Общий органический углерод — достаточно надежный показатель содержания в воде органических веществ, в среднем численно равный 50 % массы органических веществ (Зенин, Белоусова, 1988).

Многолетняя динамика содержания органического вещества за период наблюдений 1981–2018 гг. имела четко выраженную направленность (рис. 6.7). Как показали предыдущие исследования, максимальные (среднегодовые) величины данного показателя отмечались в 1981–1986 гг., затем произошло их снижение, в последние годы для всего водоема характерны одинаковые величины органического вещества.

В более ранних исследованиях (1970-е гг.) для воды оз. Имандра по содержанию общего органического углерода были отмечены значения от 2,8 до 4,5 мгО/л (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). В исследованиях 2011–2018 гг. данный показатель составлял в среднем по акватории: Большая Имандра — 3,6 мгО/л; Йокостровская — 4,7 мгО/л; Бабинская — 3,8 мгО/л (рис. 6.8). В Большой и Бабинской Имандре содержание органического вещества оставалось практически неизменной величиной по всей акватории, а также в воде подводящего и отводящего каналов. В Йокостровской Имандре, вследствие большого количества болотных массивов на водосборной площади, окисляемость немного выше, чем в остальных плесах озера.

В сезонной динамике величины перманганатной окисляемости сильных колебаний не наблюдалось. Незначительное увеличение отмечалось во время интенсивного развития гидробионтов (весна-лето) и снижение — в осенне-зимний период.

Анализ временной динамики общего органического углерода и сезонной динамики окисляемости выявил близкие средние величины для всех трех плесов,

что свидетельствует об относительной стабильности процессов, происходящих в озере, таких как привнос органического вещества со стоком рек, поступление органики при отмирании водных организмов и с бытовыми стоками, интенсивность переработки органики в водоеме.

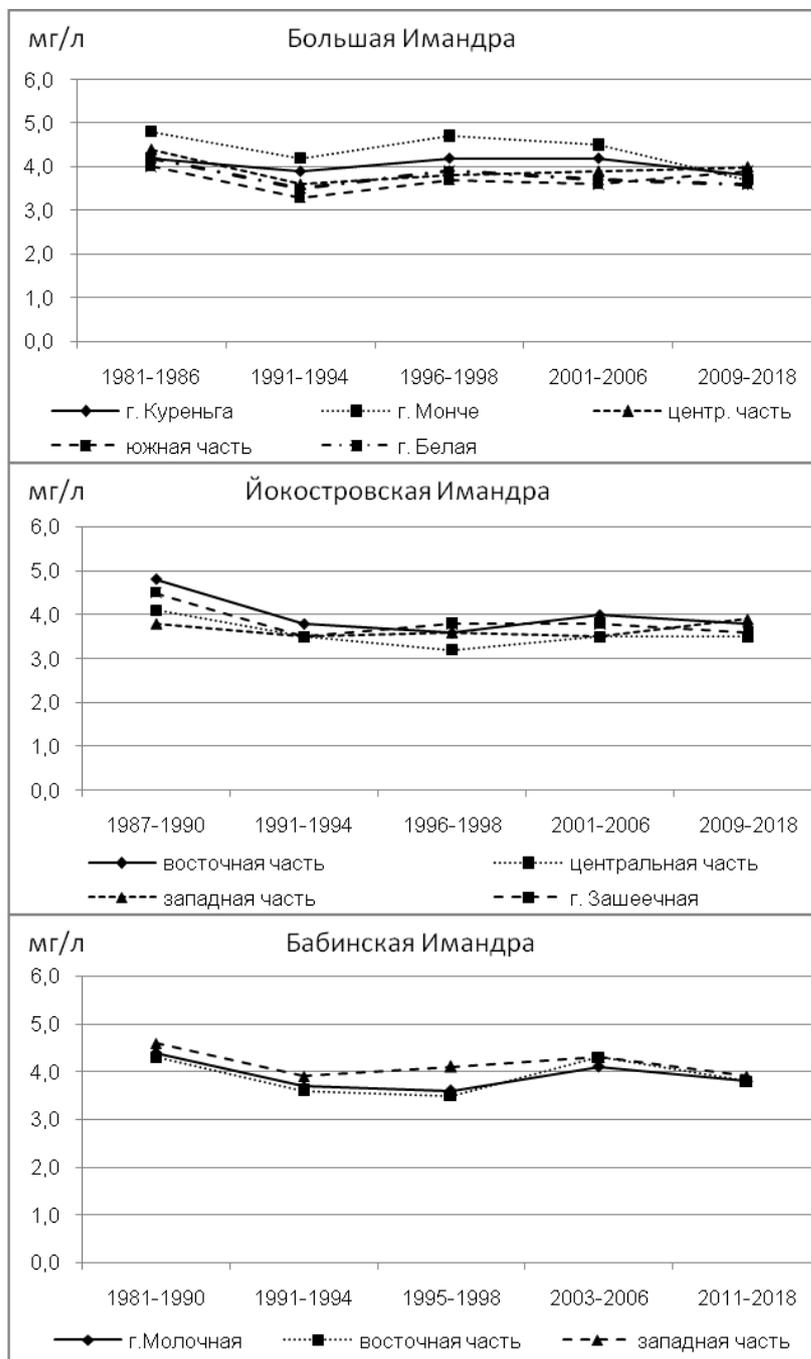


Рис. 6.7. Динамика содержания общего органического углерода (мгС/л) в оз. Имандра

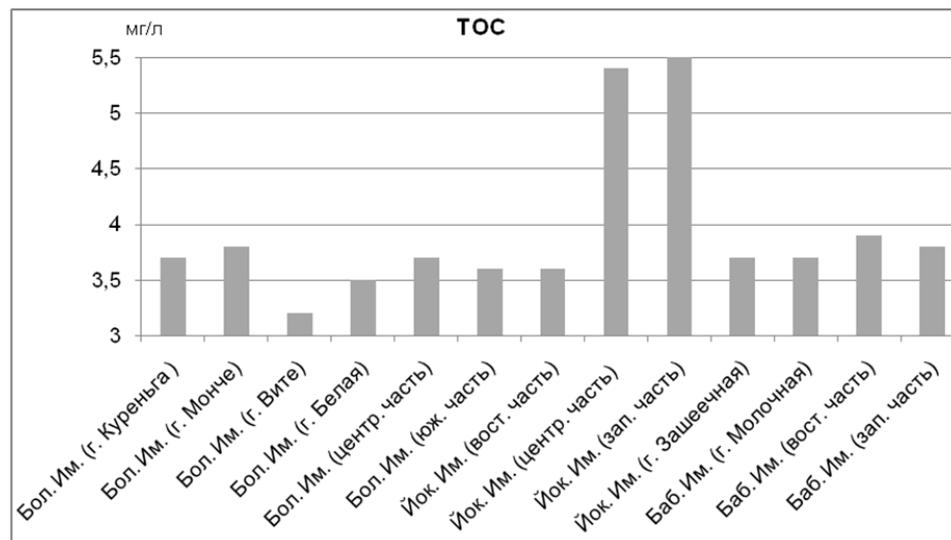


Рис. 6.8. Содержание общего органического углерода (мгС/л) в водах плесов оз. Имандра

В целом, в водной среде плесов оз. Имандра содержание органического вещества (по перманганатной окисляемости) ниже его природного количества. Пониженные значения определены также в период вегетации — весной и летом. В обогреваемой зоне Бабинской Имандры интенсивность минерализации органического вещества повышена из-за усиления активности биохимических процессов в теплой воде. В губе Камка, куда в летний период раньше перемещали садки форелевого хозяйства и где отсутствует течение, повышенное содержание органического связано, вероятно, с попаданием в водную среду корма для форели.

6.6. Биогенные вещества

К биогенным элементам относят соединения кремния, азота, фосфора и железа. Их соотношение может изменяться как в течение года (сезонные колебания), так и от года к году. Угрозу для нормального функционирования водоема представляет чрезмерное поступление биогенных элементов (в первую очередь соединений азота и фосфора), содержащихся в промышленных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных стоках. В итоге накапливается значительное количество этих веществ, что, в свою очередь, приводит ко многим неблагоприятным последствиям: «цветение» и ухудшение качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб. Среди современных проблем водной экологии особое место занимает эвтрофирование водоемов, и эта проблема становится актуальной для различных типов водных экосистем, так как повышается уровень биопродуктивности, меняется видовой состав биологических сообществ, нарушается устойчивость трофических связей.

Многочисленные исследования по проблеме эвтрофирования показывают, что при изменении режима поступления биогенных элементов изменяется и структура экосистемы водоема. Трудность оценки последствий антропогенного эвтрофирования заключается в том, что изменения в функционировании систем

на первом этапе незаметны. Сложно отличить от природных вариаций в развитии экосистемы, такие нарушения, как сезонные и межгодовые колебания гидродинамических процессов, климатические изменения и циклы развития биоты. В озерах биогенные элементы ассимилируются водными организмами, и уровень биопродуктивности водоемов зависит как от общего количества этих веществ, так и от соотношения их концентраций в водной толще. Биогенные вещества относятся к основным гидрохимическим показателям состояния озера, определяющим условия его функционирования. Изменение во времени концентраций биогенных веществ в озере определяется не только динамикой (течения, конвекция, турбулентная диффузия и др.), но и всем комплексом продукционно-деструкционных процессов.

Содержание различных форм фосфора и азота в оз. Имандра колеблется в широких пределах (табл. 6.3), при этом в природном состоянии водоем характеризовался очень низким содержанием биогенных элементов — NO_3 до 35 мкг/л и PO_4 до 8 мкг/л — и по трофическому статусу относился к олиготрофному (Рихтер, 1926).

В настоящее время отмечается их рост, что обусловлено поступлением промышленных и коммунально-бытовых сточных вод. В период исследований 2009–2018 гг. содержание биогенных веществ в плесах оз. Имандра изменялось в зависимости от сезона года и района отбора. Был выполнен анализ годовых изменений общего фосфора и кремния, сезонная динамика минеральных и органических форм азота.

Динамические изменения изучались в районах наиболее интенсивного и специфического техногенного воздействия на водоем. Сезонная динамика в плесе Большая Имандра рассматривалась на примере губы Монче — района воздействия отходов медно-никелевого производства (поступление сточных вод с предприятия «Североникель» и коммунально-бытовых вод г. Мончегорска), губы Белая — района воздействия отходов апатит-нефелинового производства (стоки комбината АО «Апатит» и коммунальные стоки городов Кировск и Апатиты). Сезонная динамика в плесе Йокостровская Имандра была рассмотрена на примере ее центральной части — района умеренного, но комплексного влияния различных техногенных факторов, являющегося зоной транзита загрязненных вод. Здесь происходит смешивание природных и загрязненных вод Большой Имандры. Сезонная динамика биогенных веществ для плеса Бабинская Имандра показана на примере губы Молочной — района теплового влияния Кольской АЭС. Сброс предприятием подогретых вод в эту губу привел к активизации биохимических процессов и, следовательно, к увеличению содержания биогенных элементов.

Азот. Одним из важнейших биогенных веществ является азот, лимитирующий продуктивность фитопланктона (рис. 6.9). Трансформация азотсодержащих соединений — сложный процесс, обусловивший разнообразие минеральных форм азота, которые присутствуют в воде в трех формах — аммонийной, нитритной и нитратной. Основное питательное значение для биоты водоема имеют именно минеральные формы азота. Непрерывный круговорот азотистых соединений заключается в переводе $\text{N}_{\text{орг}}$ в NH_4^+ в результате аммонификации, далее идет окисление NH_4^+ до NO_2^- и NO_3^- (нитрификация) и потребление NO_3^- бактерио- и фитопланктоном, что замыкает этот процесс.

Содержание основных гидрохимических параметров в плесах озера Имандра
(в числителе — медиана, в знаменателе — min-max)

Период	Цветность, град.	Органическое вещество, мг/л	NH ₄ , мкг N/л	NO ₃ , мг/л	N _{общ} , мкг N/л	PO ₄ , мкг P/л	P _{общ} , мкг P/л	Si, мг/л
Большая Имандра (губа Куреньга)								
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,2</u> 1,6–6,7	–	–	–	–	<u>8</u> 2–32	<u>1</u> 0,8–2,1
1991–1995 ^{3*}	<u>23</u> 12–39	<u>3,9</u> 2,5–5,1	<u>20</u> 4–258	<u>8</u> 1–355	<u>230</u> 99–884	<u>7</u> 2–55	<u>18</u> 5–60	<u>0,6</u> 0–3,5
1996–1998 ^{3*}	<u>24</u> 11–63	<u>4,2</u> 3,6–7,8	<u>16</u> 1–66	<u>27</u> 1–150	<u>179</u> 98–335	<u>1</u> 0–14	<u>14</u> 8–35	<u>1,3</u> 0,5–3,8
2001–2006	<u>14</u> 8–23	<u>4,2</u> 3,5–5,2	<u>21</u> 8–32	<u>12</u> 0–190	<u>219</u> 150–395	<u>0</u> 0–3	<u>12</u> 6–22	<u>0,6</u> 0,1–1,5
2009–2018	<u>10</u> 7–13	<u>3,7</u> 2,4–4,6	<u>20</u> 1–21	<u>1</u> 0–28	<u>225</u> 144–279	<u>2</u> 0–3	<u>13</u> 9–21	<u>0,5</u> 0–1,1
Большая Имандра (губа Монче)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>4,2</u> 3,7–5,4	–	–	–	–	<u>62</u> 8–178	<u>1,5</u> 0,5–3,7
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,8</u> 1,6–7,5	–	–	–	–	<u>20</u> 8–200	<u>1,8</u> 0,7–5,1
1991–1995 ^{3*}	<u>27</u> 7–42	<u>4,2</u> 2,5–5,8	<u>50</u> 4–253	<u>25</u> 1–382	<u>220</u> 110–780	<u>25</u> 3–116	<u>38</u> 2,234	<u>1,5</u> 0–3,6
1996–1998 ^{3*}	<u>30</u> 11–39	<u>4,7</u> 4,1–5,3	<u>25</u> 3–83	<u>5</u> 0–73	<u>203</u> 143–315	<u>1</u> 0–19	<u>22</u> 11–46	<u>2,0</u> 0–2,8
2001–2006	<u>14</u> 8–18	<u>4,5</u> 3,4–5,5	<u>22</u> 3–82	<u>6</u> 0–76	<u>242</u> 125–455	<u>3</u> 0–20	<u>30</u> 11–65	<u>1,4</u> 0,1–3,6
2009–2018	<u>11</u> 8–16	<u>3,8</u> 2,7–5,1	<u>56</u> 2–146	<u>17</u> 0–540	<u>273</u> 124–820	<u>5</u> 1–68	<u>24</u> 5–81	<u>1,0</u> 0,1–3,6

Период	Цветность, град.	Органическое вещество, мг/л	NH ₄ , мкг N/л	NO ₃ , мг/л	N _{общ} , мкг N/л	PO ₄ , мкг P/л	P _{общ} , мкг P/л	Si, мг/л
Большая Имандра (губа Вите)								
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,0</u> 3,4–4,1	–	–	–	–	<u>20</u> 20–20	<u>0,5</u> 0,3–0,7
1991–1995 ^{3*}	<u>26</u> 24–28	<u>3,2</u> 3,2–3,2	–	<u>1</u> 1–1	<u>194</u> 172–216	<u>2</u> 2–2	<u>5</u> 5–5	<u>0,8</u> 0,8–0,9
2001–2006	<u>7</u> 7–7	<u>3,5</u> 3,5–3,6	<u>13</u> 10–15	<u>2</u> 1–2	<u>146</u> 121–170	<u>2</u> 1–2	<u>17</u> 16–17	<u>0,4</u> 0,4–0,4
2009–2018	<u>8</u> 7–9	<u>3,2</u> 2,7–3,3	<u>18</u> 2–82	<u>0</u> 0–9	<u>151</u> 119–242	<u>2</u> 1–3	<u>9</u> 7–41	<u>0,6</u> 0,4–0,6
Большая Имандра (губа Белая)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>3,4</u> 2,9–4,5	–	–	–	–	<u>70</u> 22–720	<u>0,7</u> 0,1–2,4
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,2</u> 1,6–6,3	–	–	–	–	<u>34</u> 0–320	<u>0,3</u> 0–2,1
1991–1995 ^{3*}	<u>21</u> 6–32	<u>3,5</u> 2,7–4,0	<u>31</u> 2–706	<u>112</u> 3–1942	<u>300</u> 111–4010	<u>10</u> 3–182	<u>32</u> 6–235	<u>0,3</u> 0–3,8
1996–1998 ^{3*}	<u>22</u> 3–25	<u>3,9</u> 3,4–4,1	<u>14</u> 4–100	<u>170</u> 52–443	<u>365</u> 252–765	<u>6</u> 0–19	<u>48</u> 36–189	<u>0,5</u> 0,3–1,0
2001–2006	<u>10</u> 5–13	<u>3,7</u> 2,5–4,3	<u>39</u> 1–267	<u>119</u> 0–2089	<u>366</u> 132–2278	<u>6</u> 0–253	<u>58</u> 17–630	<u>0,3</u> 0,1–2,9
2009–2018	<u>8</u> 5–16	<u>3,5</u> 2,9–5,3	<u>24</u> 0–593	<u>82</u> 1–2950	<u>281</u> 152–3530	<u>5</u> 0–470	<u>31</u> 13–617	<u>0,4</u> 0–4,5
Большая Имандра (центральная акватория плеса)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>3,8</u> 3,4–4,3	–	–	–	–	<u>78</u> 8–105	<u>0,7</u> 0,5–1,0
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,4</u> 3,8–6,3	–	–	–	–	<u>14</u> 3–190	<u>0,7</u> 0,2–1,1

Период	Цветность, град.	Органическое вещество, мг/л	NH ₄ , мкг N/л	NO ₃ , мг/л	N _{общ} , мкг N/л	PO ₄ , мкг P/л	P _{общ} , мкг P/л	Si, мг/л
1991–1995 ^{3*}	<u>20</u> 12–25	<u>3,6</u> 3,1–3,8	<u>35</u> 7–45	<u>76</u> 1–140	<u>177</u> 95–235	<u>8</u> 5–19	<u>12</u> 6–62	<u>0,4</u> 0–1,7
1996–1998 ^{3*}	<u>20</u> 2–23	<u>3,8</u> 3,5–4,0	<u>23</u> 2–67	<u>20</u> 4–236	<u>214</u> 125–316	<u>2</u> 0–9	<u>25</u> 17–56	<u>0,5</u> 0,1–1,0
2001–2006	<u>9</u> 7–10	<u>3,9</u> 3,4–4,5	<u>12</u> 3–44	<u>1</u> 0–26	<u>180</u> 120–343	<u>1</u> 0–4	<u>24</u> 16–36	<u>0,1</u> 0–0,2
2009–2018	<u>8</u> 6–12	<u>3,7</u> 3,3–4,6	<u>21</u> 1–44	<u>5</u> 0–50	<u>210</u> 158–368	<u>3</u> 1–6	<u>22</u> 9–62	<u>0,2</u> 0–0,6
Большая Имандра (южная акватория плеса)								
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,0</u> 1,6–5,1	–	–	–	–	<u>23</u> 0–102	<u>0,4</u> 0–2,5
1991–1995 ^{3*}	<u>23</u> 12–35	<u>3,3</u> 3,0–3,8	<u>31</u> 2–42	<u>95</u> 3–645	<u>211</u> 111–946	<u>14</u> 2–37	<u>23</u> 5–49	<u>0,3</u> 0–2,1
1996–1998 ^{3*}	<u>12</u> 2–22	<u>3,7</u> 3,3–4,0	<u>14</u> 3–84	<u>11</u> 3–28	<u>184</u> 149–287	<u>1</u> 0–2	<u>27</u> 7–57	<u>0,2</u> 0,1–0,3
2001–2006	<u>8</u> 6–10	<u>3,6</u> 3,3–4,2	<u>27</u> 2–57	<u>4</u> 1–70	<u>168</u> 106–390	<u>2</u> 0–10	<u>29</u> 15–54	<u>0,1</u> 0–0,3
2009–2018	<u>8</u> 6–8	<u>3,6</u> 2,8–5,0	<u>29</u> 1–67	<u>10</u> 0–40	<u>219</u> 148–313	<u>2</u> 1–6	<u>50</u> 16–232	<u>0,2</u> 0–0,2
Йокостровская Имандра (восточная акватория)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>3,8</u> 3,5–5,1	–	–	–	–	<u>35</u> 0–93	<u>0,1</u> 0–0,5
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,8</u> 3,8–6,8	–	–	–	–	<u>4</u> 0–20	<u>0,7</u> 0,2–2,3
1991–1995 ^{3*}	<u>32</u> 18–49	<u>3,8</u> 3,5–4,7	<u>27</u> 17–31	<u>4</u> 2–8	<u>151</u> 132–213	<u>2</u> 0–3	<u>9</u> 6–34	<u>0,2</u> 0,1–2,4

Период	Цветность, град.	Органическое вещество, мг/л	NH ₄ , мкг N/л	NO ₃ , мг/л	N _{общ} , мкг N/л	PO ₄ , мкг P/л	P _{общ} , мкг P/л	Si, мг/л
1996–1998 ^{3*}	<u>18</u> 18–18	<u>3,6</u> 3,3–3,9	<u>13</u> 7–31	<u>114</u> 4–203	<u>213</u> 150–245	<u>1</u> 0–1	<u>14</u> 11–17	<u>0,2</u> 0,1–0,3
2001–2006	<u>10</u> 7–16	<u>4,0</u> 3,1–4,5	<u>8</u> 3–27	<u>1</u> 0–92	<u>191</u> 151–569	<u>1</u> 0–2	<u>13</u> 10–28	<u>0,1</u> 0,1–0,4
2009–2018	<u>8</u> 7–9	<u>3,6</u> 3,3–4,2	<u>17</u> 3–42	<u>1</u> 0–3	<u>190</u> 140–225	<u>2</u> 1–3	<u>11</u> 8–17	<u>0,1</u> 0–1,2
Йокостровская Имандра (центральная акватория)								
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,1</u> 1,6–5,8	–	–	–	–	<u>8</u> 4–48	<u>0,2</u> 0,1–2,0
1991–1995 ^{3*}	<u>17</u> 9–49	<u>3,5</u> 2,6–8,9	<u>123</u> 0–178	<u>30</u> 1–473	<u>266</u> 99–1221	<u>6</u> 0–240	<u>18</u> 0–400	<u>0,2</u> 0–1,5
1996–1998 ^{3*}	<u>17</u> 7–30	<u>3,2</u> 2,8–4,1	<u>11</u> 1–93	<u>14</u> 0–228	<u>206</u> 35–576	<u>1</u> 0–13	<u>18</u> 7–64	<u>0,2</u> 0–1,1
2001–2006	<u>8</u> 5–12	<u>3,5</u> 2,9–4,9	<u>29</u> 1–113	<u>2</u> 0–155	<u>228</u> 97–463	<u>1</u> 0–5	<u>18</u> 9–49	<u>0,1</u> 0–0,6
2009–2018	<u>8</u> 5–13	<u>5,4</u> 2,4–7,7	<u>15</u> 0–156	<u>2</u> 0–324	<u>195</u> 63–758	<u>1</u> 0–20	<u>15</u> 5–116	<u>0,2</u> 0–1,5
Йокостровская Имандра (западная акватория)								
1981–1986 ^{2*}	–	<u>3,8</u> 3,3–4,5	–	–	–	–	<u>6</u> 0–9	<u>0,3</u> 0,1–0,5
1991–1995 ^{3*}	<u>21</u> 12–48	<u>3,5</u> 2,8–5,1	<u>16</u> 6–31	<u>3</u> 1–119	<u>147</u> 114–433	<u>3</u> 0–12	<u>19</u> 0–32	<u>0,3</u> 0,1–0,5
1996–1998 ^{3*}	<u>17</u> 12–19	<u>3,6</u> 3,3–3,9	<u>21</u> 0–57	<u>2</u> 0–8	<u>175</u> 147–228	<u>1</u> 0–1	<u>13</u> 10–18	<u>0,3</u> 0,1–1,5
2001–2006	<u>11</u> 6–14	<u>3,5</u> 3,2–4,4	<u>5</u> 0–43	<u>1</u> 0–11	<u>153</u> 108–190	<u>1</u> 0–2	<u>10</u> 4–17	<u>0,2</u> 0,1–1,0

Период	Цветность, град.	Органическое вещество, мг/л	NH ₄ , мкг N/л	NO ₃ , мг/л	N _{общ} , мкг N/л	PO ₄ , мкг P/л	P _{общ} , мкг P/л	Si, мг/л
2009–2018	<u>8</u> 7–9	<u>6,0</u> 3,4–8,4	<u>9</u> 2–35	<u>1</u> 1–7	<u>182</u> 149–262	<u>1</u> 0–3	<u>8</u> 1–18	<u>0,2</u> 0,1–0,9
Йокостровская Имандра (губа Зашеечная)								
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,5</u> 3,5–4,8	–	–	–	–	<u>1</u> 0–12	<u>0,9</u> 0,8–1,1
1991–1995 ^{3*}	<u>21</u> 15–33	<u>3,5</u> 2,7–4,5	<u>15</u> 4–28	<u>3</u> 0–85	<u>165</u> 109–272	<u>2</u> 0–6	<u>9</u> 6–26	<u>0,8</u> 0,5–2,0
1996–1998 ^{3*}	<u>16</u> 15–18	<u>3,8</u> 3,3–4,0	<u>18</u> 12–42	<u>4</u> 2–41	<u>105</u> 101–156	<u>1</u> 0–1	<u>8</u> 6–11	<u>0,7</u> 0,7–0,9
2001–2006	<u>14</u> 13–26	<u>3,8</u> 3,6–4,0	<u>9</u> 1–50	<u>27</u> 1–117	<u>190</u> 133–473	<u>1</u> 0–1	<u>6</u> 5–30	<u>1,1</u> 1,0–2,6
2009–2018	<u>8</u> 5–10	<u>3,7</u> 2,9–4,4	<u>11</u> 1–58	<u>9</u> 0–51	<u>181</u> 63–350	<u>1</u> 1–3	<u>13</u> 5–43	<u>1,1</u> 0,3–1,5
Бабинская Имандра (губа Молочная)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>3,8</u> 3,1–5,8	–	–	–	–	<u>40</u> 0–140	<u>1,1</u> 0,4–1,8
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,4</u> 1,6–6,7	–	–	–	–	<u>6</u> 0–580	<u>0,9</u> 0,2–4,3
1991–1995 ^{3*}	<u>21</u> 12–36	<u>3,7</u> 3,1–4,7	<u>7</u> 2–165	<u>46</u> 1–139	<u>217</u> 114–705	<u>2</u> 0–6	<u>9</u> 2–24	<u>1,1</u> 0,1–1,4
1996–1998 ^{3*}	<u>17</u> 4–23	<u>3,6</u> 3,3–4,1	<u>7</u> 4–28	<u>21</u> 1–64	<u>148</u> 60–187	<u>1</u> 0–3	<u>6</u> 5–14	<u>1,1</u> 0,2–1,5
2001–2006	<u>12</u> 7–15	<u>4,1</u> 3,2–4,5	<u>5</u> 2–7	<u>5</u> 1–53	<u>125</u> 91–132	<u>1</u> 0–3	<u>5</u> 5–6	<u>1,1</u> 0,8–1,2
2009–2018	<u>10</u> 8–12	<u>3,7</u> 2,8–4,2	<u>14</u> 3–21	<u>18</u> 1–79	<u>165</u> 103–232	<u>2</u> 1–3	<u>7</u> 4–15	<u>1,4</u> 1,2–2,0

Период	Цветность, град.	Органическое вещество, мг/л	NH ₄ , мкг N/л	NO ₃ , мг/л	N _{общ} , мкг N/л	PO ₄ , мкг P/л	P _{общ} , мкг P/л	Si, мг/л
Бабинская Имандра (восточная акватория)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>3,8</u> 3,6–4,1	–	–	–	–	<u>38</u> 31–108	<u>0,9</u> 0,5–1,3
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,3</u> 1,6–6,3	–	–	–	–	<u>4</u> 0–76	<u>0,9</u> 0,1–1,7
1991–1995 ^{3*}	<u>21</u> 15–45	<u>3,6</u> 2,7–5,8	<u>14</u> 1–73	<u>50</u> 1–150	<u>217</u> 75–1766	<u>2</u> 0–10	<u>8</u> 3–24	<u>1,1</u> 0,3–3,5
1996–1998 ^{3*}	<u>20</u> 6–21	<u>3,5</u> 3,4–4,1	<u>24</u> 5–35	<u>15</u> 7–18	<u>152</u> 109–177	<u>1</u> 0–2	<u>7</u> 4–9	<u>1,2</u> 0,2–1,5
2001–2006	<u>14</u> 7–15	<u>4,3</u> 3,5–6,5	<u>6</u> 5–32	<u>13</u> 0–39	<u>125</u> 94–283	<u>1</u> 0–2	<u>4</u> 3–22	<u>1,2</u> 1,0–2,0
2009–2018	<u>10</u> 6–11	<u>3,9</u> 3,1–4,5	<u>10</u> 0–22	<u>14</u> 0–118	<u>156</u> 66–218	<u>2</u> 0–3	<u>6</u> 4–22	<u>1,4</u> 0,9–1,7
Бабинская Имандра (западная акватория)								
1978–1979 ^{1*}	–	<u>3,9</u> 3,5–4,0	–	–	–	–	<u>70</u> 47–137	–
1981–1986 ^{2*}	–	<u>4,6</u> 3,5–6,9	–	–	–	–	<u>6</u> 3–30	<u>1,0</u> 0,9–2,0
1991–1995 ^{3*}	<u>20</u> 7–28	<u>3,6</u> 2,6–4,7	<u>10</u> 3–23	<u>5</u> 1–131	<u>147</u> 64–672	<u>2</u> 0–3	<u>6</u> 2–8	<u>1,2</u> 0,3–1,7
1996–1998 ^{3*}	<u>22</u> 17–29	<u>4,1</u> 3,7–4,5	<u>23</u> 8–44	<u>21</u> 5–49	<u>116</u> 93–170	<u>1</u> 0–1	<u>5</u> 2–7	<u>1,4</u> 0,9–1,6
2001–2006	<u>16</u> 12–16	<u>4,3</u> 3,9–4,6	<u>16</u> 4–19	<u>31</u> 3–54	<u>128</u> 121–143	<u>1</u> 0–2	<u>4</u> 4–7	<u>1,3</u> 0,9–2,0
2009–2018	<u>11</u> 8–12	<u>3,8</u> 3,5–4,4	<u>11</u> 2–43	<u>5</u> 0–53	<u>156</u> 83–332	<u>1</u> 1–3	<u>6</u> 3–14	<u>1,5</u> 1,3–1,8

Примечание. На основе работ: ^{1*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{2*} — Крючков и др., 1985; ^{3*} — Антропогенные..., 2002.

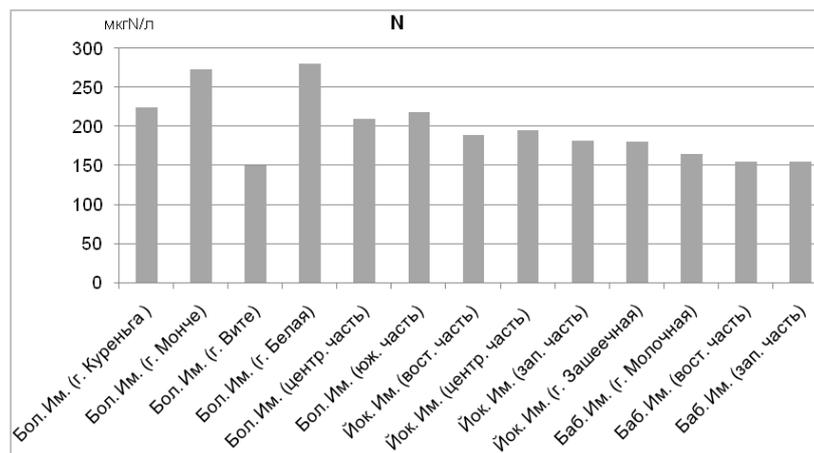


Рис. 6.9. Распределение общего азота в поверхностных водах оз. Имандра

Аммоний-ион. Аммонийный азот представляет собой первую минеральную форму азота, образующуюся в воде при разложении органического вещества. Содержание ионов аммония в водах оз. Имандра в природном состоянии варьировало от аналитического 0 до 100 мкгN/л (Крючков и др., 1985). В период исследований 2009–2018 гг. в Большой Имандре максимальное содержание NH_4 составляло 593 мкгN/л, в плесах Йокостровская и Бабинская Имандра — 156 и 43 мкгN/л соответственно (см. табл. 6.3).

В сезонной динамике данного иона в плесе Большая Имандра прослеживалась такая тенденция: низкие концентрации наблюдались в июле и августе, более высокие — в апреле и сентябре 2012 г. (рис. 6.10). Максимальные значения иона аммония зарегистрированы летом в губе Белая, что не соответствует классическому сезонному распределению для водоемов со сбалансированной экосистемой, которой является незагрязненный водоем (Никаноров, 2001). Поскольку аммонийный азот потребляется фитопланктоном, его содержание должно увеличиваться осенью и зимой и уменьшаться летом и весной. Эти данные говорят об антропогенном источнике его поступления в водоем, связанного по всей видимости, с большим количеством этого иона в период снеготаяния в весенне-летний период.

В зимний период в Йокостровской Имандре содержание аммонийного иона выше, с началом вегетации оно снижалось, за исключением августа (рис. 6.10). В июне и июле происходит снижение концентрации иона-аммония в исследуемой части водоема, что обусловлено сезонными особенностями протекания процесса аммонификации и потреблением аммония растительными сообществами в вегетационный период. Рост содержания аммония в августе и октябре указывает на то, что процессы разложения органического вещества интенсифицировались, что происходит при росте трофности водоема.

Концентрация аммония в губе Молочная в придонном слое выше, чем в поверхностном. Наименьшие концентрации зарегистрированы в мае, затем наблюдался их рост содержания летом. Максимальные содержания установлены в июле (см. рис. 6.10). Вероятно, это связано с деятельностью садкового комплекса форелевого хозяйства, сбросом подогретых вод КАЭС и указывает на усиление процессов распада накопившегося органического вещества.

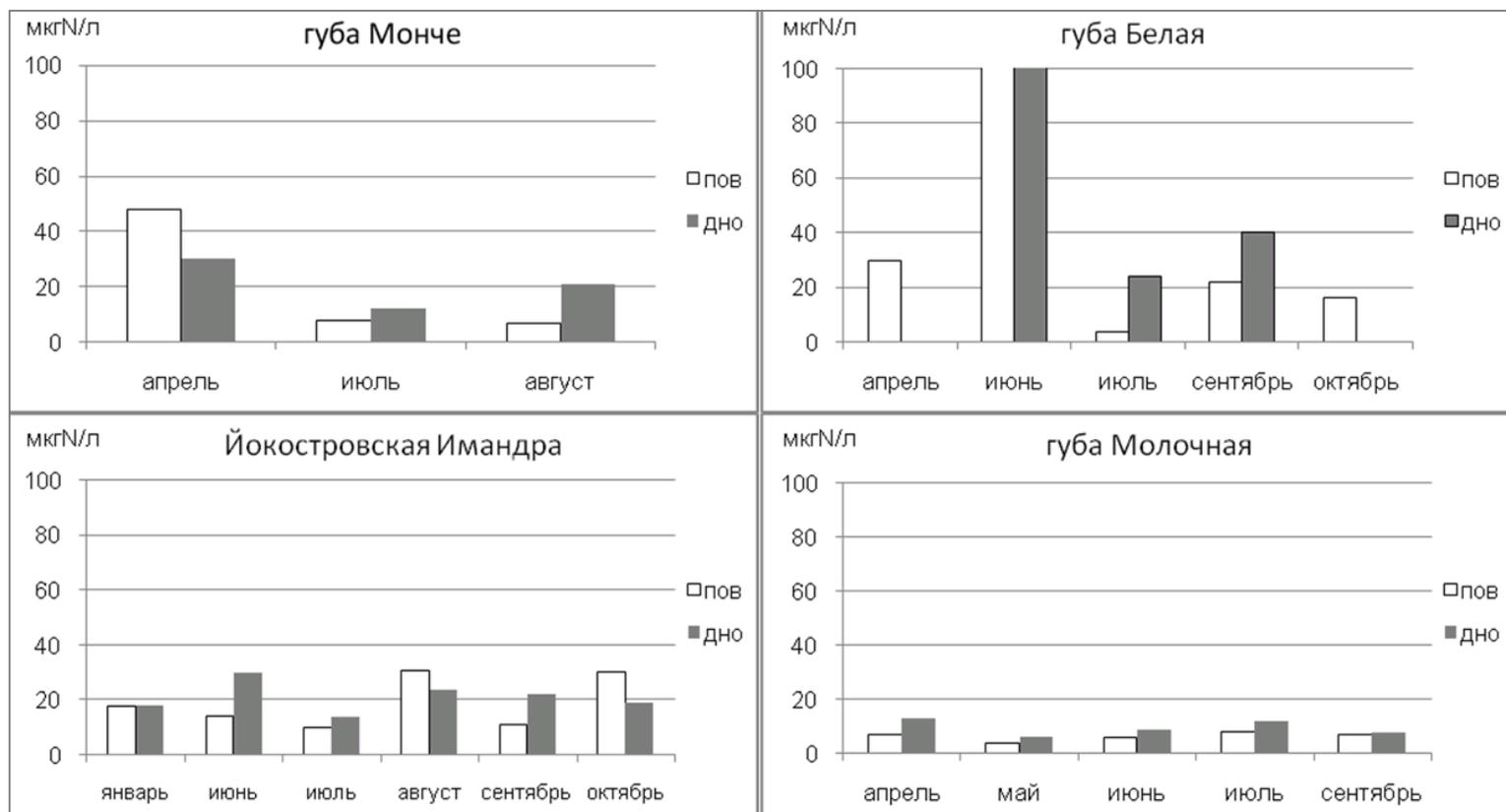


Рис. 6.10. Сезонная динамика содержания ионов аммония в оз. Имандра

Нитраты. Нитратные ионы, наряду с некоторыми другими неорганическими соединениями азота, являются конечным продуктом сложного процесса минерализации органического вещества. Содержание, режим и динамика нитратной формы азота, с одной стороны, определяется вегетационным периодом на водоеме, так как нитраты интенсивно потребляются гидробионтами (Алекин, 1970), с другой — их концентрация в значительной степени зависит от объема поступления в водоем коммунально-бытовых и промышленных (с промплощадок рудников) сточных вод. Присутствие техногенных нитратов в губе Молочной обусловлено растворением остатков взрывчатых веществ и продуктов их детонации из взорванной горной массы.

Содержание нитратов в исследуемый период изменялось в широких пределах, например, в Большой Имандре оно варьировало от 0 до 2950 мкгN/л, в Йокостровской — от 0 до 324 мкгN/л, в Бабинской — от 0 до 118 мкгN/л (см. табл. 6.3).

Высокие концентрации нитратов в губе Монче отмечались в зимний период, а с началом вегетационного периода практически исчезали, в губе Белая они фиксировались в июне (рис. 6.11). Вероятно, это связано с антропогенными источниками поступления, как и в случае с аммонием. Аналогичные высокие концентрации в июне-июле месяце наблюдались и в исследованиях 1974 г., что было объяснено поступлением хозяйственно-бытовых вод (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976).

В Йокостровской Имандре отмечена аналогичная динамика распределения нитратов в зависимости от сезона года. Низкие концентрации нитратов приходятся на вегетационный период, увеличение происходит осенью, когда потребление азота снижается и происходит разложение органического вещества. В придонном слое содержание выше, чем в поверхностном (рис. 6.11).

Количество нитратов в губе Молочная в придонном слое выше, чем в поверхностных водах. Низкие значения отмечены в весенний период, а к осени они увеличиваются. Осенью и зимой сохраняются постоянные значения. Максимальные показатели зарегистрированы в июле (рис. 6.11).

Изучение сезонной динамики выявило наличие минерального азота (NH_4 и NO_3) в озере даже в период массовой вегетации фитопланктона, что не соответствует классическому сезонному распределению для водоемов со сбалансированной экосистемой и указывает на то, что этот биогенный элемент не лимитирует развитие продукционных процессов в водоеме. Дифференцированное потребление форм азота фитопланктоном изменяет их соотношение в воде. Ион аммония потребляется планктоном непосредственно, то есть восстановления перед включением в аминокислоты не требуется.

Фосфор. Среди биогенных элементов, поступающих в водоем, особое место занимают соединения фосфора. В естественных условиях он поступает в водоем путем вымывания водорастворимых фосфатов из горных пород. В озере этот биогенный элемент ассимилируется гидробионтами, и уровень биопродуктивности водоема зависит как от общего количества этого вещества, так и от соотношения его минеральных концентраций в водной толще. Активно включаясь во внутриводоемный круговорот, соединения фосфора интенсивно аккумулируются в донных отложениях, что является одной из причин незамкнутости его баланса в биосфере (Фруммин, 2012).

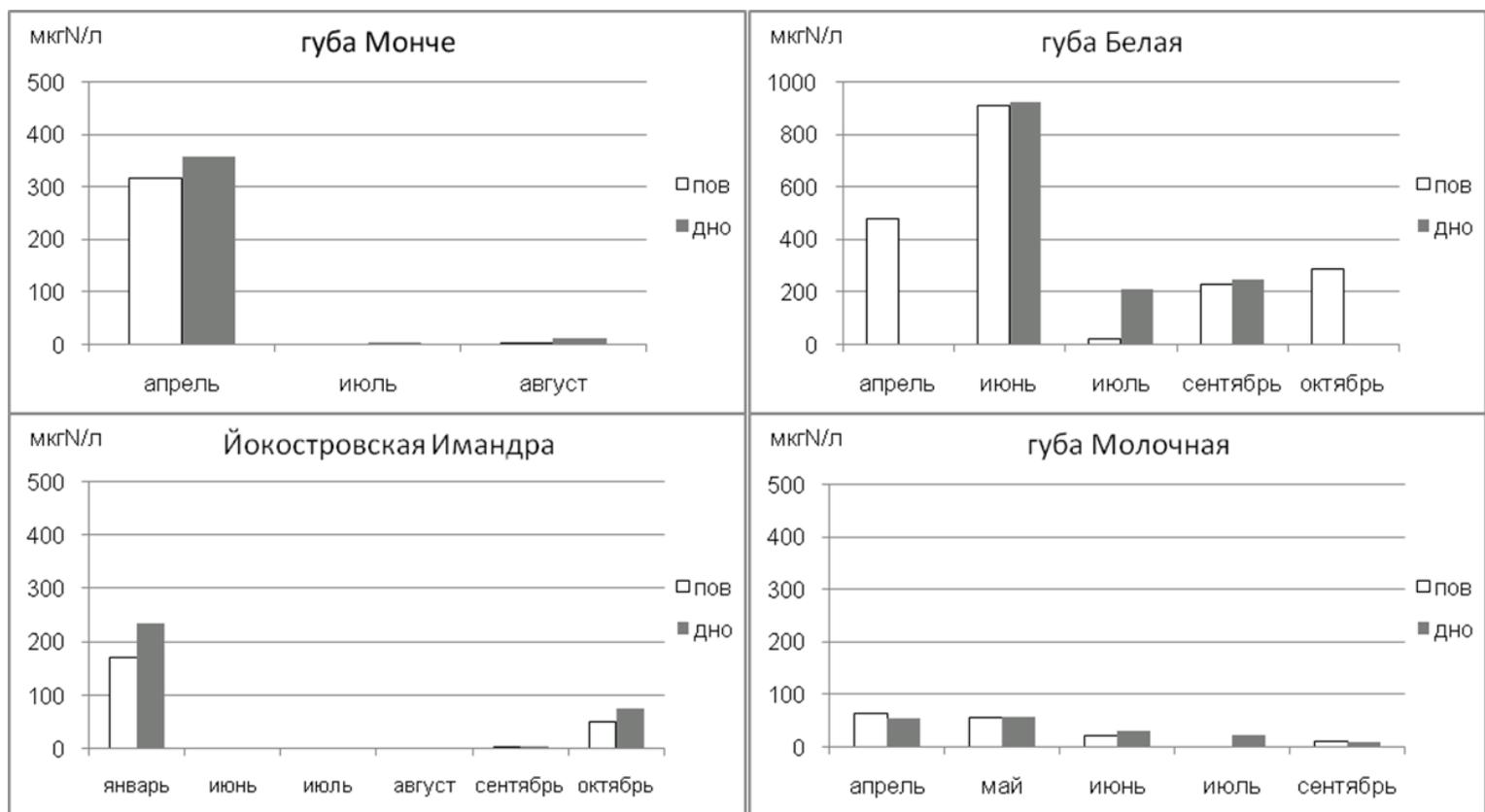


Рис. 6.11. Сезонная динамика содержания нитратов в оз. Имандра

Минеральные формы фосфора, прежде всего дигидро- и гидрофосфаты, потребляются в процессе фотосинтеза и бактериальной деструкции и переходят в органические формы. Затем происходит их окисление в водной среде при отмирании клеток планктона, вновь приводящее к образованию фосфатов. В фоновых районах озера Имандра, удаленных на значительное расстояние от основных промышленных предприятий Мурманской обл. (более 60 км), содержание фосфатов составляет 1–2 мкгР/л, общего фосфора — 1–8 мкгР/л (Аннотированный..., 2013).

Содержание общего фосфора в Большой Имандре в период 2009–2018 гг. варьировало от 5 до 617 мкгР/л, в Йокостровской — от 5 до 116 мкгР/л, в Бабинской — от 3 до 22 мкгР/л (см. табл. 6.3, рис. 6.12).

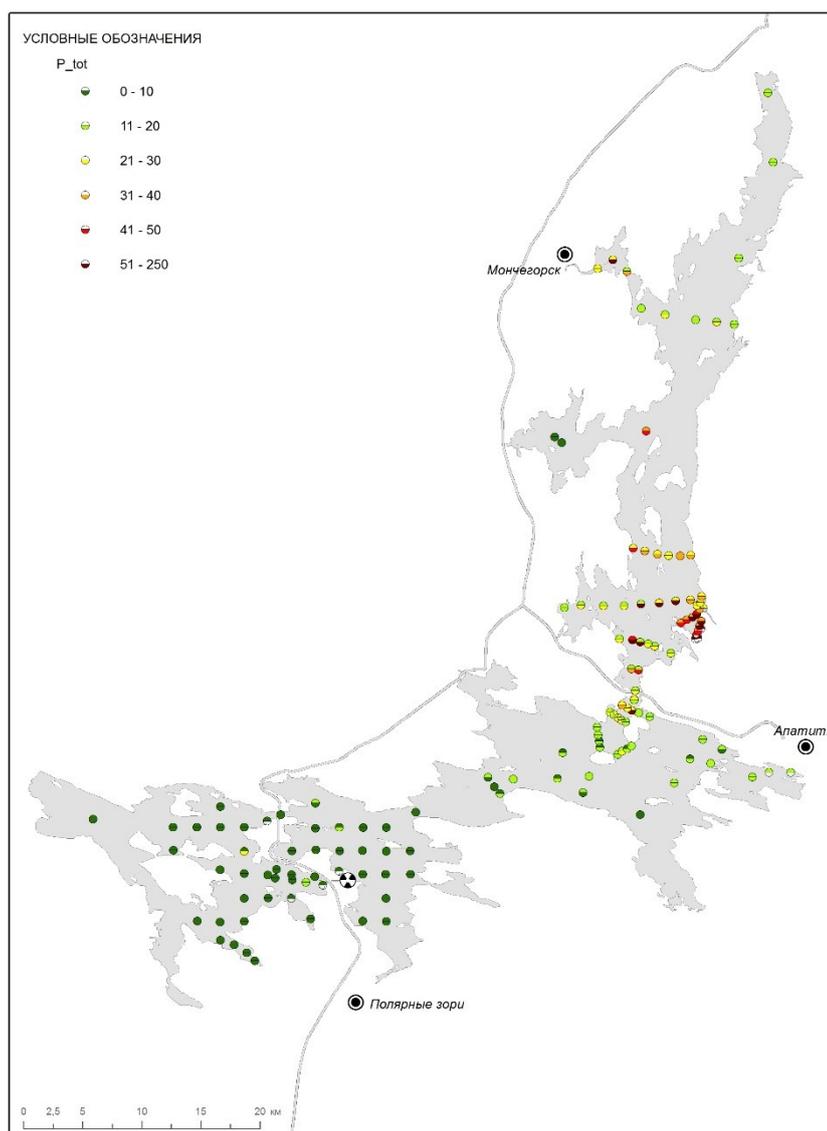


Рис. 6.12. Пространственное распределение общего фосфора в поверхностных водах оз. Имандра, мкгР/л

Анализ временной динамики общего фосфора в плесах оз. Имандра показал, что наибольшую фосфорную нагрузку испытывают плесы Большая и Йокостровская Имандра, где в настоящее время наблюдается повышение уровня трофности. По уровню продуктивности их можно отнести к мезотрофному типу. В плесе Бабинская Имандра, напротив, произошло снижение концентрации общего фосфора, в настоящее время по уровню продуктивности его можно отнести к олиготрофному (рис. 6.13). Пунктирной линией на рисунке отмечены границы уровня общего фосфора: нижняя граница — для олиготрофного водоема, верхняя — для мезотрофного (Galvez-Cloutier, Sanchez, 2007).

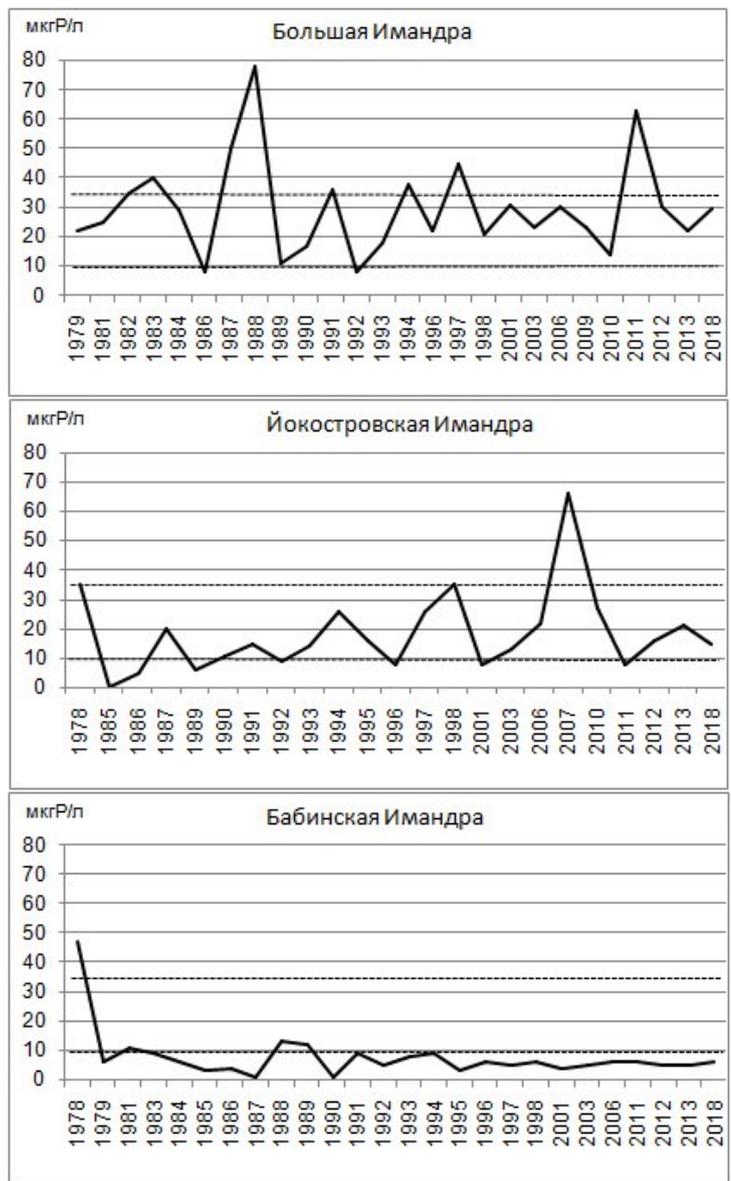


Рис. 6.13. Динамика содержания общего фосфора в плесах оз. Имандра

Фосфаты. Содержание фосфатов в Большой Имандре во время исследований 2009–2018 гг. варьировало от 0 до 470 мкгР/л, в Йокостровской — от 0 до 20 мкгР/л, в Бабинской — от 1 до 3 мкгР/л (см. табл. 6.3).

В 2011–2012 гг. сезонная динамика содержания минерального фосфора в губах Монче и Белая характеризовалась постепенным нарастанием от лета к осени. Исключением можно назвать июнь в губе Белая (как и в случае с минеральным азотом), когда были зарегистрированы очень высокие концентрации фосфатов (рис. 6.14).

Оптимальные для фитопланктона концентрации фосфора составляют 2–10 мкгР/л, с повышением уровня до 200 мкгР/л жизнедеятельность водорослей угнетается (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). В придонном слое содержание минерального фосфора выше, чем в поверхностном.

В Йокостровской Имандре содержание минерального фосфора низкое, более высокие значения наблюдаются в подледный период (рис. 6.14). В летний период (во время интенсивного развития водорослей) содержание фосфора уменьшается, а с августа, когда происходит снижение биологической активности, его концентрация возрастает.

В губе Молочной плеса Бабинская Имандра были зарегистрированы низкие содержания минерального фосфора, а также отмечалось отсутствие значительных сезонных изменений (рис. 6.14). Более высокие значения наблюдались в зимний период.

Кремний в природных водах присутствует в виде минеральных (кремневая кислота) и органических соединений. Этот элемент активно потребляется планктоном, особенно диатомовыми водорослями. При их отмирании он частично переходит в воду, а большей частью захоранивается в донных отложениях. Как видно из рис. 6.15, в Большой Имандре происходит снижение концентрации кремния, в Бабинской — увеличение. Значительная часть кремния сравнительно быстро выпадает из круговорота из-за крайне медленного растворения скелетов и створок диатомей и достаточно высокой скорости их оседания в донных илах.

Содержание кремния за исследуемый период в Большой Имандре варьировало в диапазоне от 0 до 4,5 мг/л, в Йокостровской — от 0 до 1,5 мг/л, в Бабинской — от 0,7 до 2,0 мг/л (см. табл. 6.3).

В ходе анализа было показано, что в целом содержание биогенных элементов в водной среде рассматриваемых плесов оз. Имандра, по сравнению с природным их состоянием, возросло. И связано это не только с процессами эвтрофирования олиготрофного водоема, но и с внутренними биологическими процессами на всей акватории озера, определяемыми обменными потоками между различными структурными элементами водной системы. Необходимо также отметить снижение самоочищающей способности оз. Имандра, которая хорошо проявляется лишь в слабоэвтрофных, остающихся сбалансированными в продукционно-деструкционном и трофическом отношении водоемах.

Таким образом, поддержание высоких концентраций биогенных элементов в плесе Большая Имандра привело к ухудшению качества водной среды и в Бабинской Имандре и их выравниванию с концентрациями в более загрязненной Йокостровской Имандре за счет перекачки по каналу Кольской атомной электростанции.

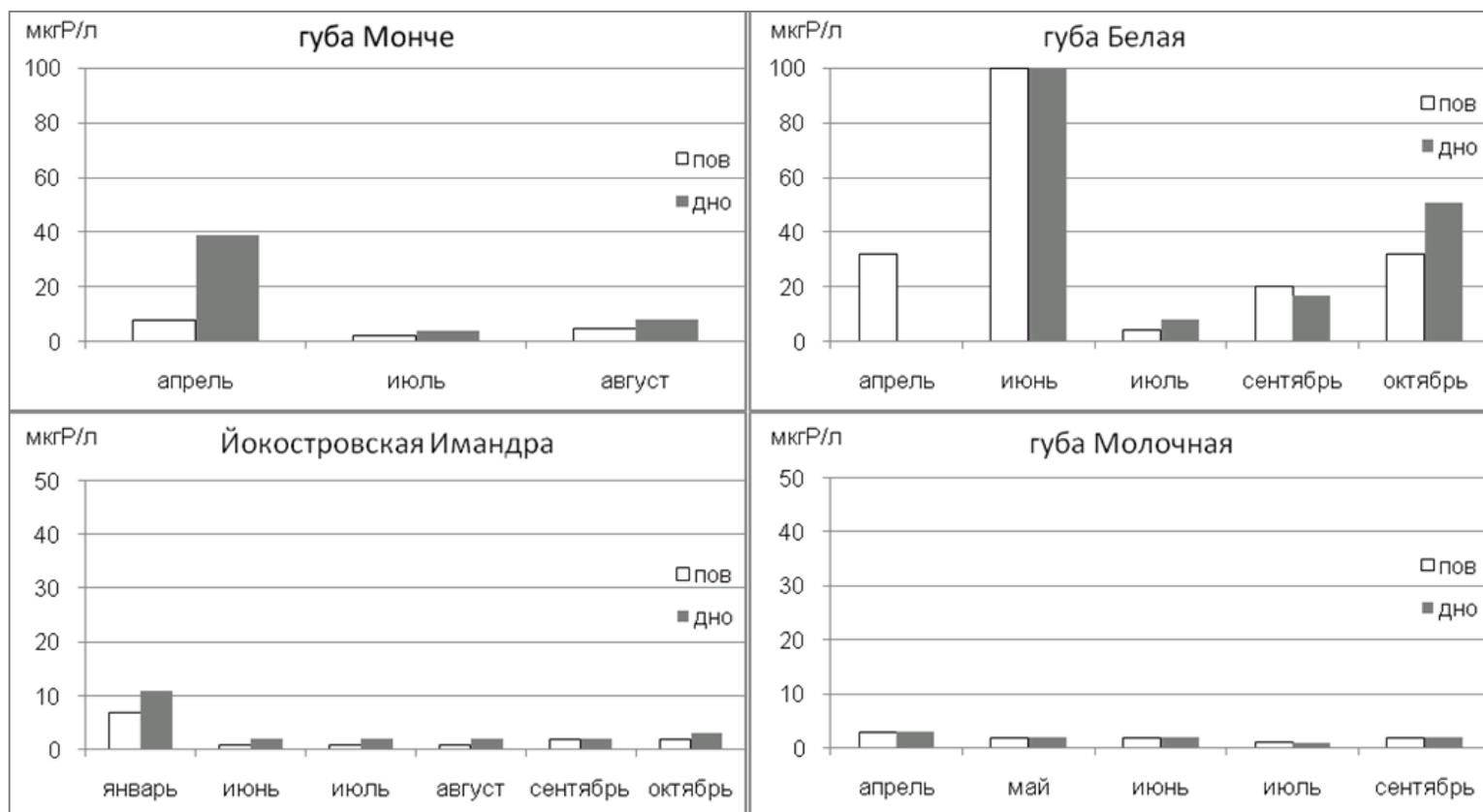


Рис. 6.14. Сезонная динамика содержания фосфатов в оз. Имандра



Рис. 6.15. Динамика изменения концентраций кремния в оз. Имандра

6.7. Микроэлементы

Основные вещества, загрязняющие оз. Имандра, — это тяжелые металлы: никель, медь, алюминий, стронций, марганец (табл. 6.4). Антропогенным источником поступления никеля и меди является деятельность медно-никелевого комбината в г. Мончегорск, расположенного по прямой в 58 км от истока реки Нива. Расстояние, которое преодолевает по озеру водный поток от места сброса сточных вод комбината до стока из озера, примерно 77 км. Стронций и алюминий являются компонентами сточных вод АО «Апатит». Загрязненные воды с естественным стоком преодолевают около 40 км до поступления в подводящий канал КАЭС, а далее в Бабинскую Имандру и около 45 до стока из озера — реки Нива (Сандимиров, 2020).

Медь. Концентрация меди медленно снижается по направлению движения загрязненного потока из Большой Имандры к Йокостровской (рис. 6.16).

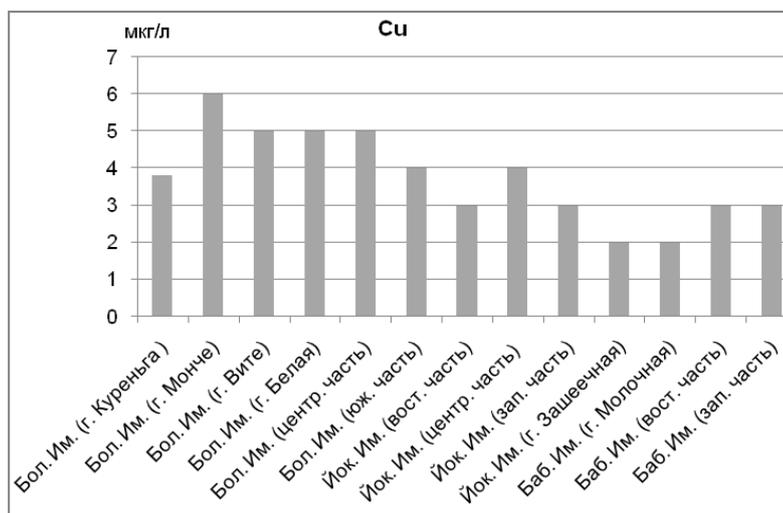


Рис. 6.16. Среднее содержание меди в поверхностных водах оз. Имандра

Таблица 6.4

Содержание основных загрязняющих веществ в плесах озера Имандра (числитель — медиана, знаменатель — min-max)

Период, годы	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Cu, мкг/л	Ni, мкг/л	Zn, мкг/л	Mn, мкг/л	Sr, мкг/л
Большая Имандра (губа Куреньга)							
1991–1995*	$\frac{19}{8-60}$	$\frac{21}{8-56}$	$\frac{6}{4-9}$	$\frac{17}{5-27}$	$\frac{3}{0-18}$	$\frac{13}{3-26}$	$\frac{59}{47-65}$
1996–1998*	$\frac{27}{10-57}$	$\frac{35}{11-57}$	$\frac{3}{1-5}$	$\frac{10}{2-19}$	$\frac{1}{1-8}$	$\frac{9}{1-26}$	$\frac{53}{46-70}$
2001–2006	$\frac{30}{13-83}$	$\frac{36}{12-55}$	$\frac{4}{3-6}$	$\frac{6}{4-11}$	$\frac{1}{1-5}$	$\frac{11}{3-35}$	$\frac{54}{29-64}$
2009–2018	$\frac{16}{16-46}$	$\frac{17}{18-52}$	$\frac{4}{3-5}$	$\frac{5}{4-10}$	$\frac{1}{0-2}$	$\frac{15}{15-48}$	$\frac{49}{45-58}$
Большая Имандра (губа Монче)							
1991–1995*	$\frac{22}{8-87}$	$\frac{32}{9-142}$	$\frac{19}{6-74}$	$\frac{48}{19-125}$	$\frac{5}{1-20}$	$\frac{19}{3-56}$	$\frac{36}{15-65}$
1996–1998*	$\frac{33}{12-74}$	$\frac{33}{17-63}$	$\frac{10}{5-18}$	$\frac{29}{15-57}$	$\frac{2}{1-7}$	$\frac{11}{2-26}$	$\frac{41}{8-61}$
2001–2006	$\frac{23}{14-90}$	$\frac{36}{9-55}$	$\frac{9}{4-15}$	$\frac{18}{10-46}$	$\frac{2}{1-4}$	$\frac{12}{5-35}$	$\frac{39}{19-61}$
2009–2018	$\frac{16}{7-180}$	$\frac{26}{11-184}$	$\frac{6}{3-110}$	$\frac{14}{5-99}$	$\frac{1}{0-10}$	$\frac{17}{2-149}$	$\frac{44}{22-76}$
Большая Имандра (губа Вите)							
1991–1995*	$\frac{27}{23-30}$	$\frac{7}{5-8}$	$\frac{12}{12-13}$	$\frac{15}{14-16}$	$\frac{12}{9-15}$	$\frac{2}{2-3}$	$\frac{34}{34-34}$
2001–2006	$\frac{39}{36-42}$	$\frac{33}{28-38}$	$\frac{5}{5-6}$	$\frac{10}{10-10}$	$\frac{4}{4-4}$	$\frac{9}{7-10}$	$\frac{54}{53-55}$
2009–2018	$\frac{17}{10-116}$	$\frac{15}{5-45}$	$\frac{5}{5-6}$	$\frac{7}{5-9}$	$\frac{1}{0-1}$	$\frac{13}{6-47}$	$\frac{39}{37-60}$

Продолжение таблицы 6.4

Период, годы	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Cu, мкг/л	Ni, мкг/л	Zn, мкг/л	Mn, мкг/л	Sr, мкг/л
Большая Имандра (губа Белая)							
1991–1995*	<u>69</u> 18–219	<u>26</u> 6–71	<u>5</u> 3–10	<u>15</u> 3–50	<u>7</u> 1–16	<u>13</u> 2–41	<u>76</u> 53–206
1996–1998*	<u>80</u> 41–100	<u>40</u> 23–53	<u>5</u> 4–11	<u>13</u> 6–17	<u>1</u> 1–3	<u>16</u> 4–21	<u>81</u> 62–87
2001–2006	<u>83</u> 30–248	<u>51</u> 15–95	<u>4</u> 3–14	<u>7</u> 3–9	<u>2</u> 1–19	<u>12</u> 4–24	<u>72</u> 41–157
2009–2018	<u>65</u> 19–306	<u>30</u> 11–129	<u>5</u> 3–6	<u>7</u> 2–11	<u>2</u> 0–11	<u>11</u> 1–53	<u>67</u> 51–166
Большая Имандра (центральная акватория плеса)							
1991–1995*	<u>25</u> 6–120	<u>15</u> 4–58	<u>8</u> 4–14	<u>27</u> 11–225	<u>5</u> 1–13	<u>8</u> 1–59	<u>55</u> 42–110
1996–1998*	<u>38</u> 7–91	<u>24</u> 8–53	<u>5</u> 4–8	<u>14</u> 11–19	<u>2</u> 1–4	<u>10</u> 1–34	<u>69</u> 49–80
2001–2006	<u>56</u> 17–104	<u>26</u> 9–47	<u>5</u> 4–6	<u>9</u> 8–20	<u>1</u> 1–4	<u>10</u> 4–59	<u>62</u> 45–86
2009–2018	<u>36</u> 17–168	<u>18</u> 8–90	<u>5</u> 4–7	<u>7</u> 6–11	<u>1</u> 0–5	<u>12</u> 7–55	<u>56</u> 50–77
Большая Имандра (южная акватория плеса)							
1991–1995*	<u>21</u> 11–68	<u>9</u> 4–28	<u>7</u> 4–12	<u>16</u> 9–20	<u>6</u> 2–17	<u>3</u> 1–48	<u>90</u> 50–125
1996–1998*	<u>38</u> 26–56	<u>23</u> 20–24	<u>4</u> 2–7	<u>9</u> 2–15	<u>1</u> 1–2	<u>4</u> 2–19	<u>68</u> 58–76
2001–2006	<u>57</u> 25–90	<u>27</u> 12–46	<u>4</u> 3–6	<u>8</u> 6–10	<u>1</u> 1–5	<u>9</u> 7–15	<u>64</u> 36–86
2009–2018	<u>40</u> 18–145	<u>17</u> 8–85	<u>4</u> 3–5	<u>5</u> 4–12	<u>1</u> 0–2	<u>12</u> 5–255	<u>60</u> 567–78

Продолжение таблицы 6.4

Период, годы	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Cu, мкг/л	Ni, мкг/л	Zn, мкг/л	Mn, мкг/л	Sr, мкг/л
Йокостровская Имандра (восточная акватория)							
1991–1995*	$\frac{29}{8-70}$	$\frac{22}{3-35}$	$\frac{8}{3-18}$	$\frac{10}{7-25}$	$\frac{5}{2-7}$	$\frac{6}{2-92}$	$\frac{59}{54-67}$
1996–1998*	$\frac{62}{11-110}$	$\frac{23}{9-95}$	$\frac{4}{4-6}$	$\frac{11}{10-13}$	$\frac{1}{0-1}$	$\frac{8}{1-18}$	$\frac{72}{59-84}$
2001–2006	$\frac{63}{39-87}$	$\frac{26}{12-41}$	$\frac{3}{3-4}$	$\frac{5}{5-6}$	$\frac{1}{1-1}$	$\frac{5}{3-7}$	$\frac{78}{76-79}$
2009–2018	$\frac{17}{10-79}$	$\frac{14}{5-74}$	$\frac{3}{3-4}$	$\frac{4}{3-7}$	$\frac{2}{0-4}$	$\frac{8}{4-50}$	$\frac{54}{53-73}$
Йокостровская Имандра (центральная акватория)							
1991–1995*	$\frac{20}{3-150}$	$\frac{14}{2-149}$	$\frac{6}{4-30}$	$\frac{14}{8-41}$	$\frac{4}{1-24}$	$\frac{3}{0-78}$	$\frac{66}{16-124}$
1996–1998*	$\frac{99}{7-163}$	$\frac{50}{7-110}$	$\frac{6}{0-20}$	$\frac{13}{8-17}$	$\frac{1}{0-7}$	$\frac{15}{1-35}$	$\frac{74}{53-99}$
2001–2006	$\frac{33}{15-112}$	$\frac{17}{7-78}$	$\frac{5}{3-6}$	$\frac{8}{4-19}$	$\frac{2}{0-10}$	$\frac{9}{2-128}$	$\frac{59}{27-80}$
2009–2018	$\frac{20}{9-253}$	$\frac{16}{6-180}$	$\frac{4}{2-16}$	$\frac{4}{4-15}$	$\frac{3}{0-23}$	$\frac{10}{1-130}$	$\frac{54}{48-80}$
Йокостровская Имандра (западная акватория)							
1991–1995*	$\frac{19}{6-51}$	$\frac{9}{4-76}$	$\frac{4}{3-8}$	$\frac{9}{3-14}$	$\frac{4}{1-20}$	$\frac{2}{1-7}$	$\frac{59}{44-75}$
1996–1998*	$\frac{33}{16-41}$	$\frac{19}{15-25}$	$\frac{3}{3-4}$	$\frac{7}{5-9}$	$\frac{1}{1-4}$	$\frac{8}{2-13}$	$\frac{61}{56-83}$
2001–2006	$\frac{23}{8-35}$	$\frac{13}{8-23}$	$\frac{3}{2-8}$	$\frac{5}{3-6}$	$\frac{1}{0-10}$	$\frac{4}{1-13}$	$\frac{58}{23-68}$
2009–2018	$\frac{15}{10-27}$	$\frac{14}{11-33}$	$\frac{3}{3-4}$	$\frac{4}{3-6}$	$\frac{1}{0-1}$	$\frac{9}{5-19}$	$\frac{54}{49-60}$

Продолжение таблицы 6.4

Период, годы	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Cu, мкг/л	Ni, мкг/л	Zn, мкг/л	Mn, мкг/л	Sr, мкг/л
Йокостровская Имандра (губа Зашеечная)							
1991–1995*	$\frac{13}{4-85}$	$\frac{12}{5-42}$	$\frac{4}{2-16}$	$\frac{4}{1-34}$	$\frac{4}{1-21}$	$\frac{2}{1-23}$	$\frac{54}{33-80}$
1996–1998*	$\frac{16}{4-22}$	$\frac{16}{4-22}$	$\frac{3}{2-6}$	$\frac{4}{2-8}$	$\frac{1}{0-4}$	$\frac{2}{1-5}$	$\frac{58}{44-80}$
2001–2006	$\frac{17}{11-31}$	$\frac{14}{10-16}$	$\frac{2}{2-3}$	$\frac{3}{3-4}$	$\frac{1}{0-1}$	$\frac{2}{2-3}$	$\frac{58}{56-59}$
2009–2018	$\frac{12}{7-293}$	$\frac{10}{7-600}$	$\frac{2}{2-5}$	$\frac{2}{1-5}$	$\frac{1}{0-11}$	$\frac{3}{2-37}$	$\frac{50}{47-66}$
Бабинская Имандра (губа Молочная)							
1991–1995*	$\frac{11}{4-41}$	$\frac{11}{8-34}$	$\frac{4}{2-18}$	$\frac{3}{2-47}$	$\frac{5}{1-25}$	$\frac{1}{1-6}$	$\frac{45}{33-65}$
1996–1998*	$\frac{18}{8-40}$	$\frac{17}{10-30}$	$\frac{2}{2-4}$	$\frac{2}{1-4}$	$\frac{2}{1-3}$	$\frac{2}{1-4}$	$\frac{63}{29-77}$
2001–2006	$\frac{14}{9-18}$	$\frac{13}{7-27}$	$\frac{3}{2-4}$	$\frac{3}{2-3}$	$\frac{1}{0-2}$	$\frac{2}{1-3}$	$\frac{52}{24-60}$
2009–2018	$\frac{10}{7-26}$	$\frac{9}{6-28}$	$\frac{2}{2-4}$	$\frac{2}{1-3}$	$\frac{1}{1-2}$	$\frac{1}{1-4}$	$\frac{47}{43-60}$
Бабинская Имандра (восточная акватория)							
1991–1995*	$\frac{14}{3-80}$	$\frac{11}{3-159}$	$\frac{4}{3-12}$	$\frac{4}{1-14}$	$\frac{7}{2-43}$	$\frac{1}{0-10}$	$\frac{42}{22-61}$
1996–1998*	$\frac{16}{15-29}$	$\frac{14}{14-17}$	$\frac{2}{2-3}$	$\frac{2}{1-2}$	$\frac{1}{1-2}$	$\frac{1}{1-2}$	$\frac{60}{40-67}$
2001–2006	$\frac{15}{10-24}$	$\frac{14}{10-32}$	$\frac{3}{2-11}$	$\frac{2}{2-6}$	$\frac{2}{1-5}$	$\frac{2}{1-4}$	$\frac{50}{42-58}$
2009–2018	$\frac{11}{8-46}$	$\frac{11}{4-60}$	$\frac{3}{2-8}$	$\frac{1}{1-3}$	$\frac{3}{0-7}$	$\frac{1}{1-7}$	$\frac{40}{35-57}$

Окончание таблицы 6.4

Период, годы	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Cu, мкг/л	Ni, мкг/л	Zn, мкг/л	Mn, мкг/л	Sr, мкг/л
Бабинская Имандра (западная акватория)							
1991–1995*	$\frac{17}{3-77}$	$\frac{17}{9-85}$	$\frac{4}{3-10}$	$\frac{4}{1-32}$	$\frac{8}{1-17}$	$\frac{1}{0-23}$	$\frac{38}{34-48}$
1996–1998*	$\frac{21}{16-35}$	$\frac{19}{6-34}$	$\frac{2}{2-3}$	$\frac{2}{1-5}$	$\frac{1}{1-3}$	$\frac{1}{0-3}$	$\frac{45}{36-53}$
2001–2006	$\frac{18}{15-19}$	$\frac{15}{10-25}$	$\frac{2}{2-2}$	$\frac{2}{1-3}$	$\frac{1}{0-2}$	$\frac{1}{1-3}$	$\frac{47}{27-58}$
2009–2018	$\frac{11}{7-55}$	$\frac{11}{6-50}$	$\frac{3}{2-9}$	$\frac{1}{1-4}$	$\frac{5}{0-27}$	$\frac{2}{1-8}$	$\frac{41}{34-50}$

Примечание. * — составлено на основе работы (Антропогенные..., 2002).

В 1990-гг. в придонных слоях плеса Йокостровская Имандра, ближе к стоку из озера, содержание меди в летний период могло достигать высоких значений — до 16 мкг/л. В 2009 г. максимальное количество меди отмечено в губе Монче — до 110 мкг/л (в среднем 6 мкг/л), в 2018 г. оно составляло 7,2 мкг/л. В поверхностных водах южной части плеса Большая Имандра и плесов Йокостровская и Бабинская Имандра концентрация меди варьируется от 2 до 4 мкг/л, составляя в среднем 3 мкг/л (рис. 6.17).

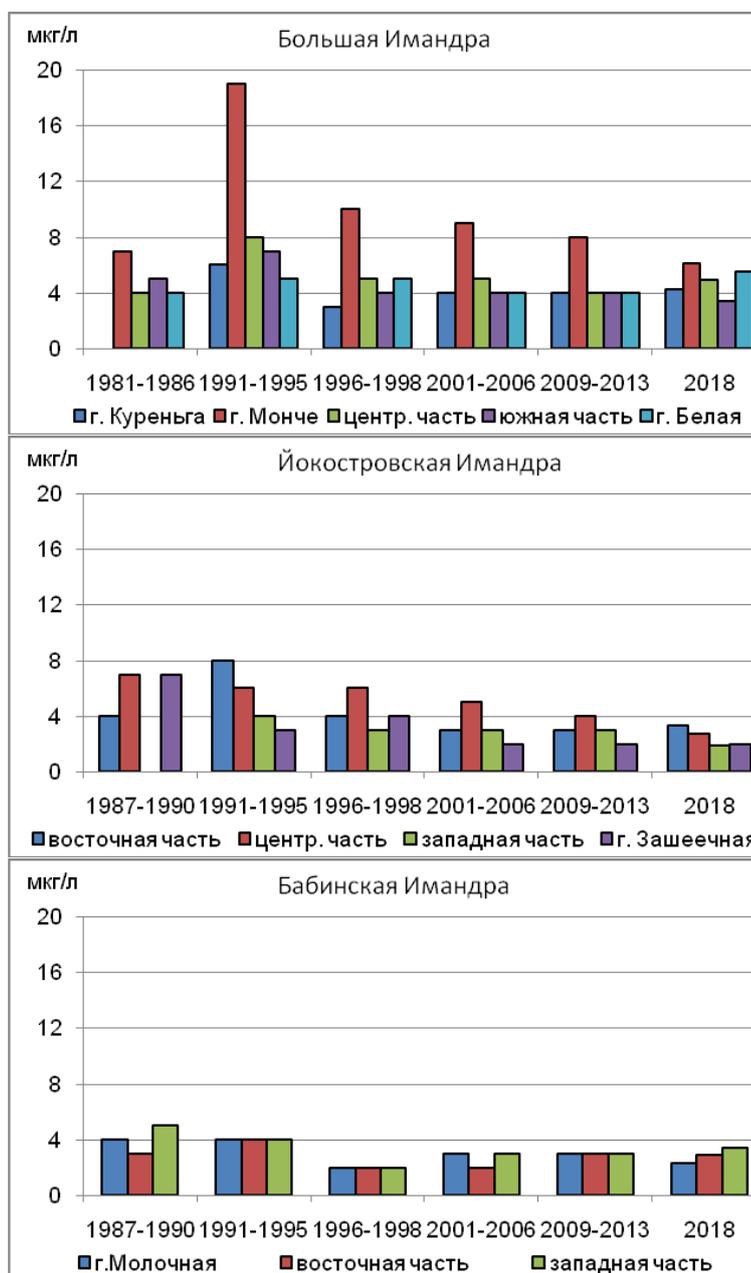


Рис. 6.17. Динамика содержания меди в оз. Имандра

В Бабинской Имандре высокие концентрации меди в поверхностных водах наблюдались в летний период к югу от острова Ерм, что может быть связано с аэротехногенным переносом от комбината «Североникель» ОАО «Кольская ГМК». Средний показатель концентрации меди (3 мкг/л) во все сезоны года превышал фоновый, который для водоемов Кольского полуострова составляет 1 мкг/л (Аннотированный..., 2013).

Никель является одним из наиболее распространенных загрязняющих веществ в оз. Имандра. Его максимальные концентрации, как и раньше, отмечены в Большой Имандре, высокие — в Йокостровской, вдоль восточного берега губы Зашеечная, и вблизи стока из оз. Имандра. В период исследований 2009–2018 гг. его содержание в Большой Имандре изменялось от 2 до 99 мкг/л, составляя в среднем по плесу 8,6 мкг/л (рис. 6.18). По мере распространения потока вод содержание никеля в водной среде снижается. В пробах воды из Бабинской и Йокостровской Имандры его концентрация во всей водной толще была выше фоновых значений и изменялась от 1,1 до 6,3 мкг/л, составляя в среднем 2,2 мкг/л. Даже в период интенсивного снеготаяния в водоем никель попадает с тальми водами из загрязненного аэротехногенными выбросами снежного покрова в незначительных количествах.

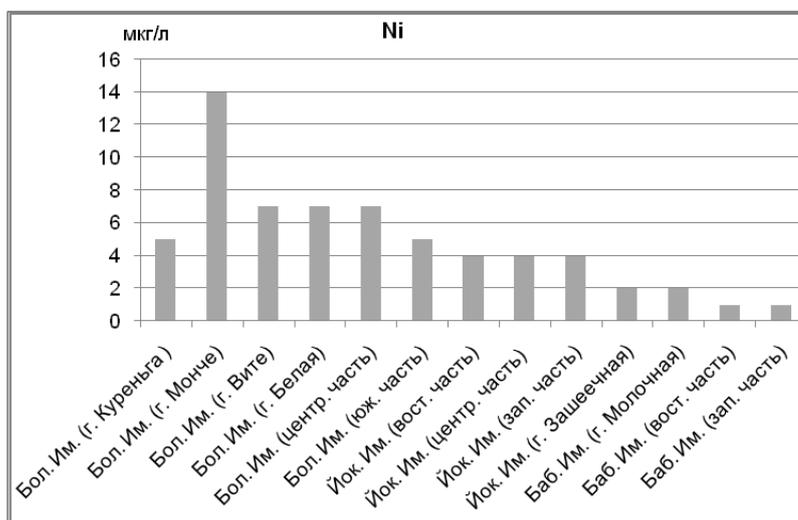


Рис. 6.18. Среднее содержание никеля в поверхностных водах оз. Имандра

Анализ распространения никеля по акватории губы Молочной и далее в Бабинской Имандре показывает, что наибольшие его количества находятся в придонных слоях. Следует отметить, что за последнее время его содержание в Бабинской Имандре снизилось: в 1978 г. средний показатель составлял 4,7 мкг/л; в 1979 г. — 4,8 мкг/л; в 1984 г. — 13,1 мкг/л; в 1985 г. — 24,3 мкг/л; в 1990 г. — 10,9 мкг/л; в 2001 г. — 2,1 мкг/л, в 2011 г. — 1,7 мкг/л, в 2018 г. — 1,4 мкг/л. В течение последнего десятилетия содержание никеля в плесах Бабинская Имандра и Йокостровская (губа Зашеечная) в целом находится на постоянном уровне и, в зависимости от концентрации в том или ином районе водоема, отличается незначительно (рис. 6.19).

Алюминий — один из самых распространенных элементов в земной коре и содержится практически в любой природной воде, но в оз. Имандра попадает в основном со сточными водами АО «Апатит». В составе тонкодисперсных взвесей нефелина алюминий поступает в губу Белую (плес Большая Имандра) при фильтрации через дамбу хвостохранилища и аэротехногенным путем — за счет их пыления в летний период.

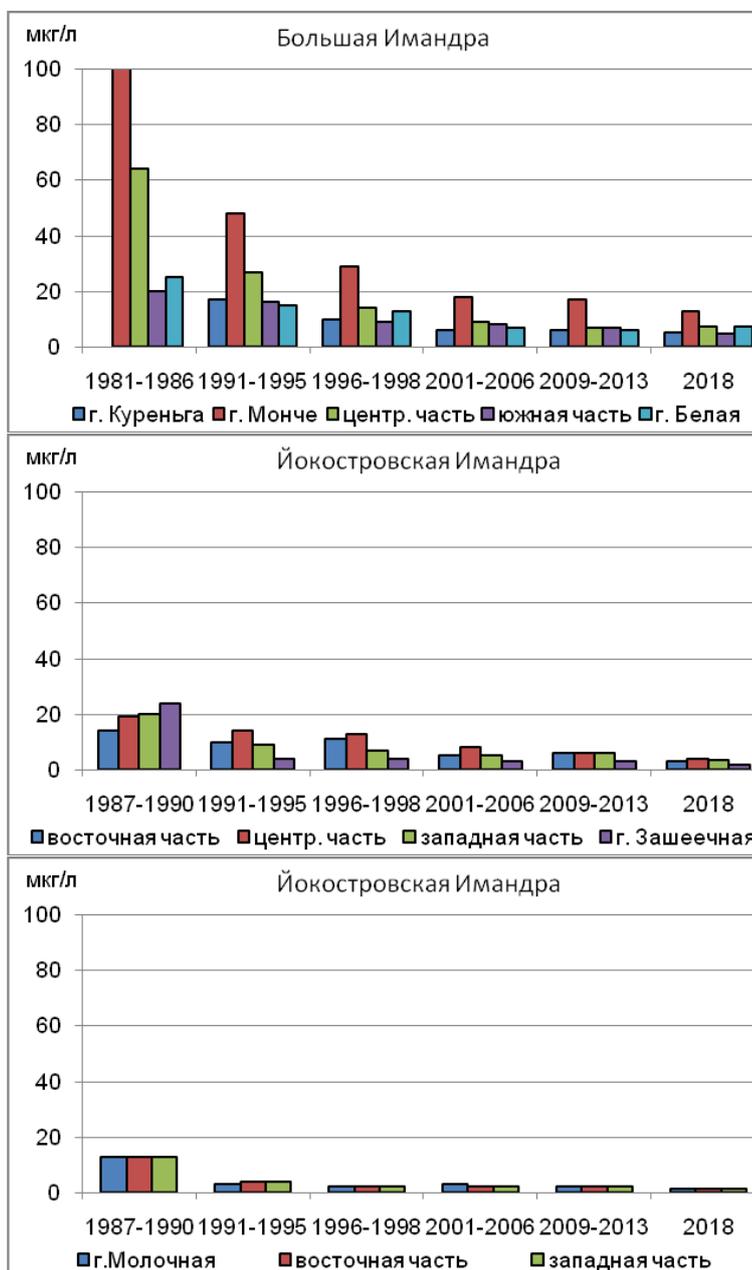


Рис. 6.19. Динамика содержания никеля в оз. Имандра

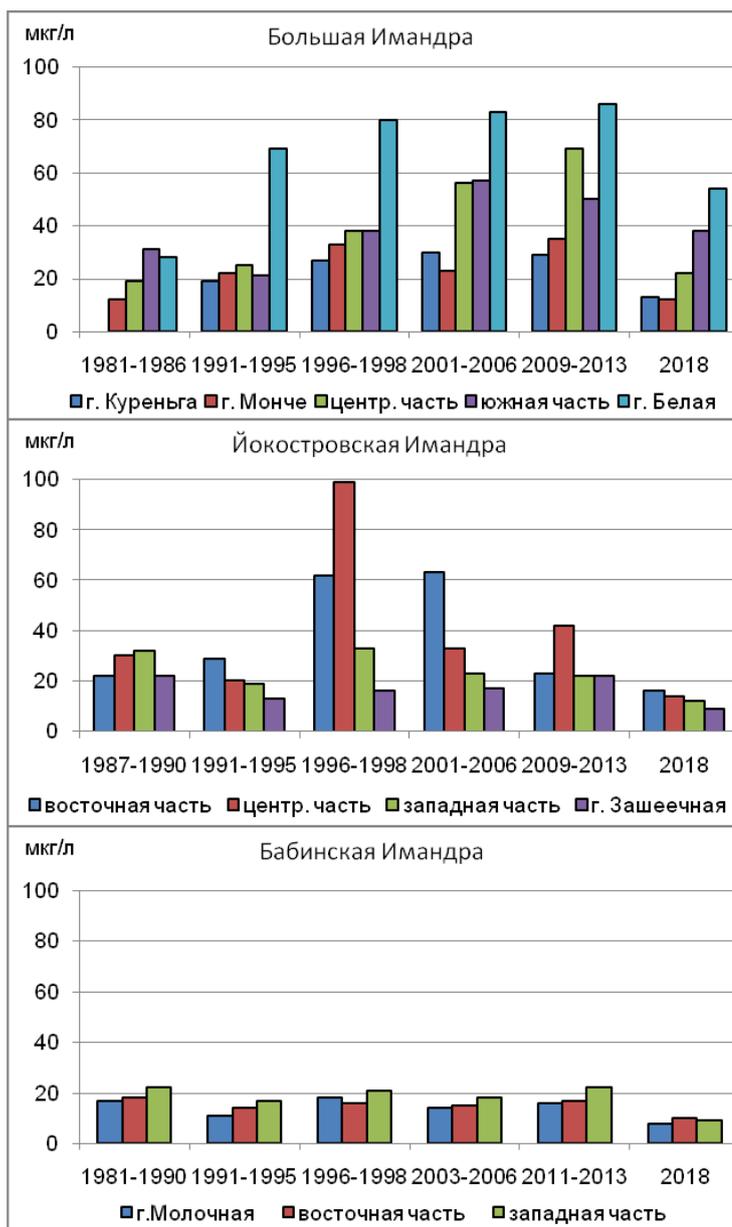


Рис. 6.20. Динамика содержания алюминия в оз. Имандра

В последнее десятилетие в Йокостровской Имандре и отдельных акваториях Большой Имандры наметилась тенденция к снижению содержания алюминия (рис. 6.20), по результатам последних исследований в 2018 г. видно, что высокое содержание этого элемента наблюдается сейчас только в центральной и южной акватории Большой Имандры и в северной акватории Йокостровской Имандры (рис. 6.21). В остальных районах озера средние значения алюминия варьируются от 16 до 29 мкг/л, что ниже принятых значений условной фоновой концентрации для Кольского полуострова ($Al < 30$ мкг/л). Самые низкие показатели отмечены в Бабинской Имандре: в поверхностных и придонных слоях на всей

акватории они изменялась от 10 до 46 мкг/л, составляя в среднем 18 мкг/л; в Йокостровской Имандре — от 12 до 63 мкг/л, составляя в среднем 27 мкг/л.

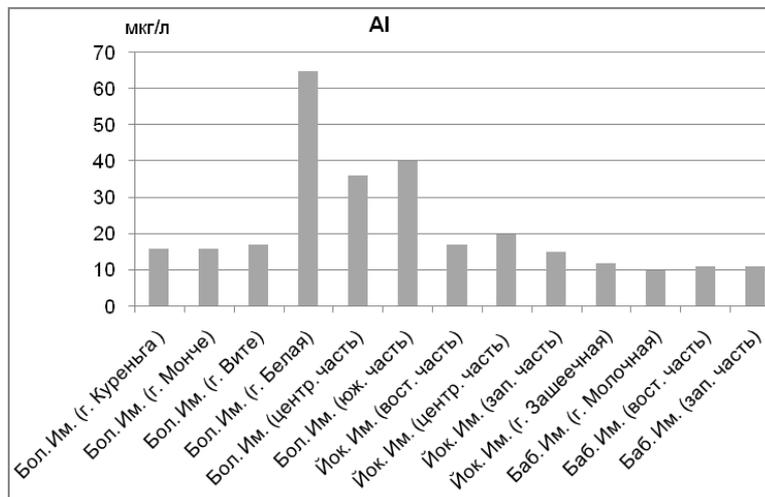


Рис. 6.21. Среднее содержание алюминия в поверхностных водах оз. Имандра

Стронций в водной среде оз. Имандра содержится в среднем по районам и по плесам в количестве от 39 до 74 мкг/л (рис. 6.22). Максимальные концентрации отмечены в Большой Имандре и придонных слоях Йокостровской Имандры. Сопоставление концентраций стронция и алюминия в воде оз. Имандра с принятыми условными фоновыми для Кольского полуострова ($Sr < 26$ мкг/л) показывает, что в последние годы содержание стронция на всей акватории озера превышает нормативное. Таким образом, загрязнение озера этим элементом продолжает нарастать (рис. 6.23). В южной части озера, в плесах Йокостровская и Бабинская Имандра, концентрация стронция тоже превышает условно фоновую.

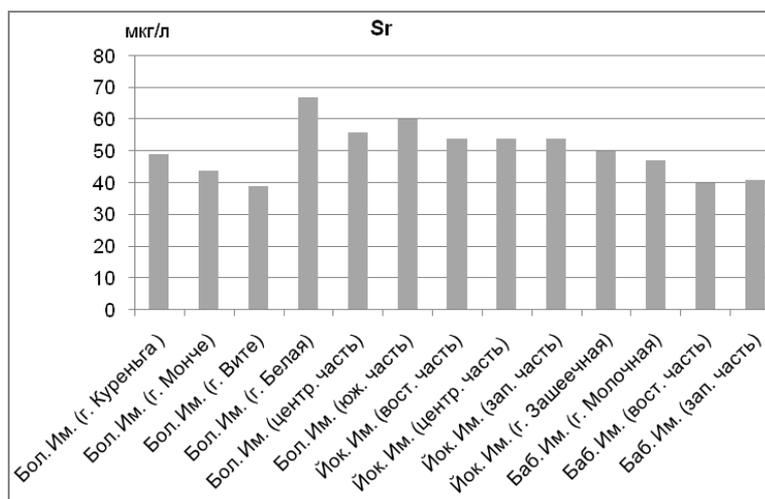


Рис. 6.22. Среднее содержание стронция в поверхностных водах оз. Имандра

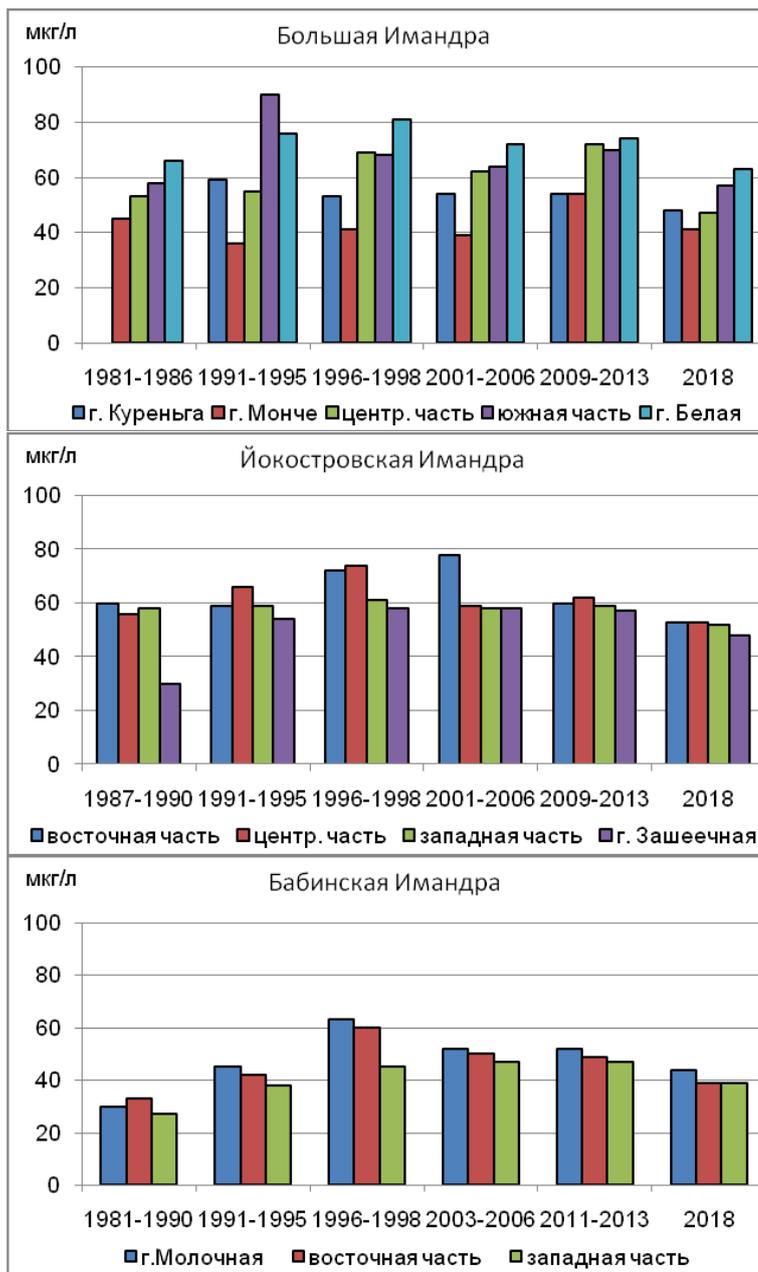


Рис. 6.23. Динамика содержания стронция в оз. Имандра

Марганец в поверхностные воды поступает в результате выщелачивания руд и других минералов, содержащих марганец. В оз. Имандра соединения этого элемента вносятся также со сточными и шахтными водами промышленных предприятий, но их влияние распространяется не так далеко по акватории (рис. 6.24). Главная форма миграции соединений марганца в поверхностных водах — взвеси, состав которых определяется, в свою очередь, составом пород и дренируемых вод. Вследствие слабого выщелачивания пород в оз. Имандра

в поверхностных слоях содержится незначительное количество марганца — от 1 до 15 мкг/л, составляя в среднем 6 мкг/л. Ранее максимальные концентрации наблюдались в придонных слоях губы Монче, южной части Большой Иmandры и северной части Йокостровской Иmandры — до 130–250 мкг/л. В настоящее время (2018 г.) в южном плесе Йокостровской и в Бабинской Иmandре концентрация марганца находится на уровне условной фоновой для озер Кольского полуострова — 2 мкг/л.

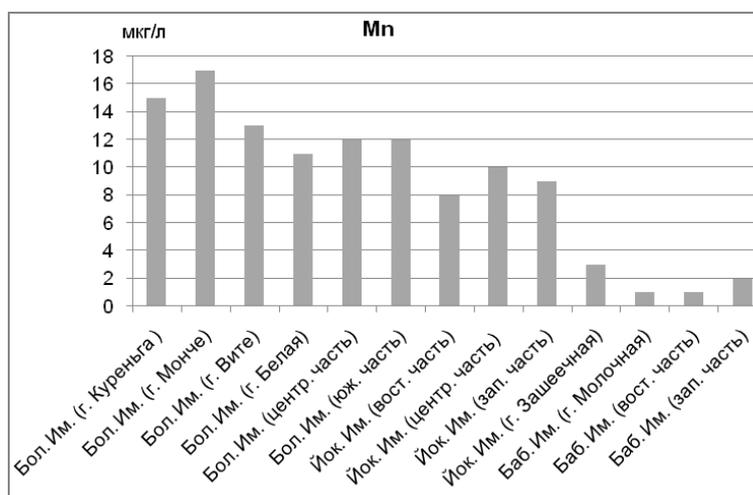


Рис. 6.24. Среднее содержание марганца в поверхностных водах оз. Иmandра

Содержание марганца в поверхностных водах подвержено сезонным колебаниям. На станциях отбора проб в летний период оно иногда превышает показатели осеннего периода в 2–3 раза. Осеннее понижение концентрации ионов марганца в природных водах Йокостровской, а затем и Бабинской Иmandры происходит в результате реакции окисления, основными параметрами которой являются температура, концентрация растворенного кислорода и величина рН. Факторами, также определяющими изменение концентраций марганца, являются соотношение между поверхностным и подземным стоком, интенсивность потребления его при фотосинтезе, разложение фитопланктона, микроорганизмов и высшей водной растительности, а также процессы осаждения его на дно водоемов.

Концентрации других загрязняющих веществ — ртути и свинца — составляют менее 0,5 мкг/л, т. е. ниже предела их количественного определения.

Для изучения структуры отличий и внутренней изменчивости химического состава вод в плесах Большой, Йокостровской и Бабинской Иmandры был использован дисперсионный анализ, в котором для анализа статистической значимости различия между средними значениями в плесах была использована величина F-критерия. Когда величина F более критического значения, межгрупповая дисперсия превышает внутригрупповую. В модель были включены параметры физико-химического состава вод. В наших исследованиях выборочное значение критерия Фишера ($F = 65,92$) намного превышает критическое, равное 1,57.

На основе анализа вкладов всех рассматриваемых переменных физико-химического состава вод и с опорой на F-критерий и соответствующий ему уровень значимости $p < 0,05$ (табл. 6.5), достоверно можно утверждать, что исследуемые плесы различаются между собой по щелочности и основным ионам минерализации (сульфаты и натрий), биогенным элементам, алюминию, стронцию, высокие значения которых в данном случае объясняются воздействием антропогенных факторов. Эти показатели проявляют степень различий в химическом составе вод между всеми тремя плесами и, судя по ним, в двух плесах гидрохимические параметры достаточно близки, но все же отличаются при переходе от Йокостровской Имандры к Бабинской, где природные условия продолжают оказывать влияние на формирование химического состава вод.

Таблица 6.5

Характеристика переменных модели дисперсионного анализа плесов оз. Имандра (значимые показатели выделены жирным шрифтом)

Переменные	Среднее	F-критерий (F критическое — 1,57)
pH	7,36	0,01
Ca	3,69	0,09
Mg	1,06	0,004
Na	9,07	14,0
K	1,89	0,51
HCO ₃	19,4	10,0
SO ₄	13,5	22,0
Cl	3,3	2,1
Общая минерализация	52,0	187,0
NH ₄	9,0	18,0
NO ₃	20,0	1980,0
N _{общ}	178,0	4326,0
PO ₄	2,0	4,42
P _{общ}	13,0	203,0
Цветность	8,0	1,60
Органическое вещество	3,7	0,05
Si	0,9	0,33
Al	36,0	449,0
Fe	24,0	55,0
Cu	3,4	1,83
Ni	4,0	16,4
Zn	0,9	0,02
Mn	11,1	60,0
Sr	57,0	104,0

Литература

1. *Алекин, О. А.* Основы гидрохимии / О. А. Алекин. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
2. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейн Баренцева моря, Белого моря и Ботнического залива Балтийского моря) : монография : в 2 частях / Н. А. Кашулин, С. С. Сандимиров, В. А. Даувальтер [и др.] ; ответственный редактор Н. А. Кашулин. Апатиты : КНЦ РАН, 2013. Ч. 1. 298 с.; Ч. 2. 253 с.
3. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра : монография / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, А. А. Лукин [и др.] ; ответственный редактор Т. И. Моисеенко. Москва : Наука, 2002. 487 с.
4. *Верещагин, Г. Ю.* Методы морфометрической характеристики озер / Г. Ю. Верещагин // Труды Олонецкой науч. экспедиции. Ч. 2. Вып. 1. Ленинград, 1930. 116 с.
5. Воздействие подогретых вод Кольской АЭС на гидрологический и гидрохимический режим губы Молочной озера Имандра : отчет НИР / рук. Моисеенко Т. И., исполн.: Яковлев В. А., Крючков В. В. // [Фонды КФАН СССР]. Апатиты, 1984. 124 с.
6. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2019 году. Мурманск, 2020. 177 с.
7. *Зенин, А. А.* Гидрохимический словарь / А. А. Зенин, Н. В. Белоусова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. 240 с.
8. Комплексное изучение и охрана озера Имандра : отчет НИР / рук. Беляева Г. В., исполн.: Чижиков В. В., Воробьева Д. Г. [и др.] // [Фонды КФАН СССР]. Апатиты, 1972.
9. Комплексное изучение Йокостровской и Бабаинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема : отчет НИР / рук. Чижиков В. В., исполн.: Воробьева Д. Г., Моисеенко Т. И. // [Фонды КФАН СССР] Апатиты, 1976. Т. 1. 269 с.
10. *Крючков, В. В.* Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья : монография / В. В. Крючков, Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Апатиты : КФАН СССР, 1985. 132 с.
11. Материалы к изучению поверхностных вод Кольского полуострова // [Фонды КНЦ АН СССР. Сб. 1]. Мурманск, 1940. 406 с.
12. *Моисеенко, Т. И.* Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера : монография / Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Ленинград : Наука, 1990. 220 с.
13. *Никаноров, А. М.* Гидрохимия / А. М. Никаноров. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
14. Отчет об экологической безопасности Кольской АЭС. Полярные Зори, 2020. 40 с.
15. *Павлова, А. С.* Распределение химических элементов между компонентами экосистемы в губе Белая (озеро Имандра, Мурманская область) / А. С. Павлова, С. С. Сандимиров, Л. П. Кудрявцева // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 1. С. 61–69.

16. Ресурсы поверхностных вод СССР : в 20 томах. Т. 1 : Кольский полуостров / под редакцией Ю. А. Елшина, В. В. Куприянова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 324 с.
17. *Рихтер, Г. Д.* Очерк исследования района озера Имандра / Г. Д. Рихтер // Труды Мурманской биологической станции. Мурманск, 1926. Т. 2. С. 32–68.
18. *Сандимиров, С. С.* Влияние технического водоснабжения Кольской АЭС на содержание тяжелых металлов в озере Имандра / С. С. Сандимиров // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 2 (82). С. 93–103.
19. *Сандимиров, С. С.* Современное состояние гидрохимических показателей южных плесов озера Имандра / С. С. Сандимиров, Л. П. Кудрявцева, О. В. Петрова // Вода: Химия и Экология. 2017. № 2. С. 9–19.
20. *Фруммин, Г. Т.* Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов : методическое пособие / Г. Т. Фруммин, Х. Жань-Жань. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2012. 28 с.
21. Eutrophication of waters. Monitoring assessment and control. Final report. OECD Cooperative Programme on monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate. Paris, 1982. 154 p.
22. *Galvez-Cloutier, R.* Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada. Monitoring and Recommendations / R. Galvez-Cloutier, M. Sanchez // Water Qual. Res. J. Canada. 2007. Vol. 42, No. 4. P. 252–268.
23. *Henriksen, A.* Critical Loads of Acidity: Nordic Surface Waters / A. Henriksen, I. Kamari, M. Posch, A. Wilander // AMBIO. 1992. Vol. 21, No. 5. P. 356–363. URL: <https://www.jstor.org/stable/i398937/> (accessed 14.03.2022).

7. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Как известно, водоемы вследствие своего расположения в пониженных участках земной поверхности служат коллекторами всех видов загрязнения. Донные отложения водоемов образуются по причине осаждения (седиментации) взвешенного в водной толще вещества, поэтому накапливают «сведения» о потоках элементов в звеньях окружающей среды (Förstner, Wittmann, 1981). Осадочные образования, в том числе и современные ДО, давно входят в круг интересов геологов при поисках полезных ископаемых, но только в последние десятилетия они стали привлекать внимание специалистов при оценке экологического состояния и мониторинге окружающей среды (Опекунов, 2012). Донные отложения являются важным источником информации о климатических, геохимических, экологических условиях, существовавших на водосборе и в самом водоеме, позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной среды. Сведения о ДО, как и данные о концентрациях элементов и веществ в растворенной и взвешенных формах, необходимы для понимания того, какое влияние они оказывают на качество воды. В результате использования этих сведений можно установить источники поступления загрязняющих веществ, в том числе микроэлементы и тяжелых металлов, изучить их миграцию и определить потенциальное токсичное действие (в повышенных концентрациях) на водные организмы. Данные о химическом составе ДО необходимы также для моделирования процессов переноса загрязняющих веществ в водных системах и окружающей среде в целом, для оценки геохимических циклов и установления доступности различных элементов в экологической системе. Они являются «хранилищами» многих загрязняющих веществ и поэтому должны быть тщательно исследованы при оценке качества воды водоемов, которые предполагается использовать в различных целях, например, для питьевого водоснабжения или рыбозахвата. Это объясняется следующими положениями (Hogowitz, 1991):

- 1) ненарушенные ДО содержат «исторические записи» прошлых химических условий и позволяют установить фоновые уровни, с которыми могут сравниваться и сопоставляться существующие условия;
- 2) под влиянием изменения физико-химических условий (например, pH, Eh, растворенный O₂, бактериальная активность) связанные с ДО соединения могут растворяться в водную толщу, поступать в пищевую цепь и иметь вторичные эффекты для водных обитателей;
- 3) некоторые относительно инертные или безвредные для окружающей среды неорганические вещества могут разрушаться или реагировать с другими, образуя растворимые и потенциально токсичные формы (например, переход элементарной ртути в метил ртути);
- 4) ДО являются одним из главных источников загрязнения и должны исследоваться для определения потенциального переноса загрязняющих веществ.

7.1. Характеристика донных отложений в многолетнем ряду исследований

Первое описание прибрежной зоны и характера распределения ДО в оз. Имандра дано Г. Д. Рихтером (1934) по результатам работы Имандровской экспедиции Географо-экономического научно-исследовательского института

при ЛГУ в 1925–1927 гг. Тогда же Г. Д. Рихтером, при участии С. Ф. Егорова, была составлена первая батиметрическая карта Имандры (в масштабе 1:100 000). По словам самого Рихтера, «карта эта, составленная на основании глазомерной съемки, не может претендовать на большую точность, но для экскурсий по озеру является наиболее подходящей». Но с тех пор батиметрией озера никто не занимался. До работ Имандровской экспедиции описание ДО озера не проводилось и все данные сводились к указаниям, что «дно озера каменисто». По результатам исследований Имандровской экспедиции было установлено, что наибольшую площадь дна озера составляют разнообразные илы, в меньшей степени песчаные грунты, а по берегам — каменистые грунты. Опираясь на собранные в 1925–1927 гг. С. Ф. Егоровым для лабораторных исследований пробы ДО оз. Имандра, впервые для Кольского полуострова В. В. Алабышев (1929) отметил нахождение сапропеля.

Согласно проведенным под руководством Г. Д. Рихтера (1934) исследованиям прибрежной зоны и характера распределения ДО оз. Имандра, большая часть береговой линии озера представлена скалами, завалами обломков коренных пород — глыб и валунов. Песчаные берега имеют гораздо меньшее распространение. По характеру образования их можно подразделить на эрозионные (песчаные обрывы) и аккумулятивные, связанные с наносом песка под действием течений. Кое-где пологие берега представлены торфяными обнажениями и болотами.

В 1960 г., до исследований И. В. Баранова (1966), данных о химическом составе ДО оз. Имандра почти не было, известен лишь анализ одного образца грунта (Кошкин и др., 1939). Летом 1960 г. комбинированным батометром было отобрано 50 колонок ДО, в которых определялось содержание органических веществ, гумуса, фосфора, железа.

Исследованиями Г. Д. Рихтера (1934) и позднее И. В. Баранова (1966) установлено, что каменные грунты обычно залегают до глубины 2–5 м, однако на многих участках озера имеются валунные нагромождения, образующие вытянутые мели — «корги». Они нередко являются продолжением островов. В сублиторали каменистые грунты сменяются песчаными грунтами с примесью гальки и гравия. Пески, чаще всего мелкие, залегают до глубины 10–15 м, с ее увеличением в них возрастает количество илистых осадков. Содержание органического вещества в песках небольшое: величина потерь при прокаливании не превышает 6–8 %. Иловые отложения занимают наибольшую площадь дна озера: выстилают практически всю профундаль. Они имеют разнообразную окраску, однако преобладают плотные зеленовато-буровато-серые. Нередко в них обнаруживаются желтовато-буроватые рыхлые рудные включения (железомарганцевые), что подтверждено исследованиями сотрудников ИППЭС (Даувальтер, Ильяшук, 2007). Илы содержат большое количество органики — значения ППП увеличиваются до 20–40 %. В некоторых крупных заливах и губах (например, Вите) содержание органических веществ в илах почти в 3 раза больше, чем в глубоководных акваториях (Баранов, 1966). Исследованиями И. В. Баранова установлена обратно пропорциональная зависимость содержания органического материала от глубины озера. Установлено, что примерно половина органического материала представлена гумусом. На глубине 10–30 м редко обнаруживаются глины, имеющие плотную консистенцию и серовато-палевую окраску, они незначительно опережают пески по содержанию органического вещества.

Содержание фосфора в поверхностных ДО Большой Имандры (вблизи Белой губы) превышали 1000 мкг/г, Бабинской — 60–70 мкг/г (Баранов, 1966).

Северная часть Большой Имандры, куда поступали стоки Оленегорского ГОКа, также характеризовалась повышенным содержанием железа.

Первые детальные исследования химического состава ДО оз. Имандра в ее северной части — Большой Имандры — с определением содержания приоритетных загрязнителей (Ni, Cu, Mn, Fe, P) были проведены сотрудниками Кольского филиала АН СССР в 1966–1968 гг. (Комплексное изучение..., 1971). Пробы ДО отбирались дночерпателем Экмана — Берджа и анализировались полуколичественным спектральным анализом, поэтому нельзя гарантировать, что построенные по результатам исследований схемы распределения валовых содержаний вышеперечисленных элементов отражали реальную ситуацию распределения элементов в поверхностных слоях ДО Большой Имандры, хотя результаты этих исследований могут отражать уровень антропогенной нагрузки на озеро во второй половине 1960-х гг.

В первой половине 1970-х гг. сотрудниками Кольского филиала АН СССР были продолжены исследования других акваторий озера — Йокостровской и Бабинской Имандры (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). В отличие от предыдущих исследований, пробы для химического анализа (спектральным полуколичественным методом) отбирались трубками-грунтоносами из верхних слоев ДО (2–14 см), следовательно, можно надеяться, что картина распределения содержаний 25 элементов, включая тяжелые металлы, отображена более достоверно, чем в предыдущем изучении Большой Имандры.

Исследованиями сотрудников Кольского филиала АН СССР в 1960–1970-х гг. установлены в ДО Большой Имандры высокие содержания никеля (600–1000 мкг/г) и меди (800–3000 мкг/г), главным образом в губах Монче и Куреньга, куда поступали стоки комбината «Североникель» и Оленегорского ГОКа (Комплексное изучение..., 1971). Максимальные содержания железа (5–10 % и более) и марганца (4–10%) были выявлены в губе Куреньга. Аномально высокие концентрации валового фосфора (3,5–6,5 %) отмечены в ДО южной части Большой Имандры, куда поступали стоки АО «Апатит». На выходе из Монче- и Вите-губы содержание фосфора снижается в 20–40 раз (до 0,1–0,3 % и менее). Содержания ранее приведенных элементов в поверхностных ДО Йокостровской и Бабинской Имандры меньше, за исключением железа. Следовательно, уже в 1960–1970-х гг. Большая Имандра была в большей степени подвержена влиянию деятельности предприятий горно-металлургического комплекса.

В 1980-х гг. сотрудниками Кольского филиала АН СССР изучение химического состава ДО оз. Имандра проводилось параллельно с изучением состояния зообентоса. В основном работы выполнялись в зонах влияния промышленных предприятий на экосистему оз. Имандра — губы Монче, Белая, Молочная. Пробы ДО отбирались дночерпателями, химический анализ проводился спектральным полуколичественным методом. Результаты этих исследований опубликованы в монографиях (Крючков и др., 1985; Моисеенко, Яковлев, 1990). В итоге выяснилось, что в 1980-е гг. усиление загрязнения оз. Имандра стоками предприятий горно-металлургического комплекса продолжилось, что выразилось в увеличении концентраций приоритетных загрязнителей в поверхностных ДО. Так, в Монче-губе содержание никеля и меди в 1983–1985 гг. достигло соответственно 12 400 и 2100 мкг/г сух. веса (Крючков, Моисеенко, 1987), а среднее содержание никеля и меди в 1980-х гг. в этом районе составляло 7060 и 661 мкг/г сух. веса соответственно (Моисеенко, Яковлев, 1990).

В Белой губе продолжал интенсивно накапливаться фосфор: его содержание в поверхностных слоях достигло 1 %. Плесы Йокостровская и Бабинская Имандра продолжали в 1980-е гг. характеризоваться как относительно незагрязненные тяжелыми металлами и фосфором.

Детальные исследования состояния ДО оз. Имандра проводятся с момента создания в 1989 г. Института проблем промышленной экологии Севера сотрудниками лаборатории водных экосистем. За прошедшие с момента его образования годы было опубликовано более 30 научных работ, в том числе монографий, статей, описывающих химический состав ДО озера (Формирование качества..., 1996; Антропогенные модификации..., 2002; Moiseenko et al., 1996, 1998; Моисеенко и др., 1997, 1998; Миграция..., 1999; Накопление..., 2000; Даувальтер и др., 1999; Dauvalter et al., 1999; Sulfur migration..., 1999; Accumulation..., 2000; Даувальтер, 2000, 2006, 2012; Dauvalter, 2000, 2006; Pyashuk et al., 2003; Даувальтер, Ильяшук, 2007; Dauvalter, Ilyashuk, 2007; Нерадовский и др., 2009; Manganese..., 2011; Структура и динамика..., 2012; Даувальтер, Кашулин, 2013а, б, 2014, 2015а, б, в; Югай и др., 2013; Денисов и др., 2015 и др.).

В настоящей работе приведены систематизированные сведения об итогах исследования ДО последнего десятилетия.

7.2. Влажность и органическое вещество в донных отложениях

Влажность и потери веса при прокаливании — показатели содержания органического материала — являются важными параметрами при исследовании донных отложений водоемов. Неуплотненные тонкодисперсные осадки (глинистые и алевроитовые илы) с размерами частиц менее 0,01 мм обладают большой пористостью и значительной влажностью, а осадки с более крупными частицами, песчаными илами и песками имеют соответственно меньшую пористость и влажность.

Распределение влажности ДО в водоеме происходит по следующей схеме. Низкие значения обнаруживаются на мелководных участках, где в отложениях доминирует крупнозернистый материал (как результат волновой деятельности), и в акваториях водоемов, примыкающих к приустьевым участкам рек, где откладывается главным образом крупнозернистый материал из-за большой скорости потока в этих участках. Наибольшие значения влажности характерны для глубоководных частей озера, однако с увеличением глубины слоев ДО их влажность снижается в процессе диагенеза вследствие уплотнения от веса вышележащих слоев и перемещения воды в эти слои. Вариации в вертикальном распределении влажности в ДО зависят от многих факторов: скорости осадкообразования, качества и характера осадков, степени уплотнения и перемешивания водными организмами и др.

Влажность может отражать также влияние хозяйственной деятельности человека, когда происходит изменение минералогического и гранулометрического состава ДО, как это происходит, например, в оз. Имандра в зоне влияния стоков АО «Апатит». Наибольшие вариации величин влажности отмечаются в ДО станций, расположенных ближе к месту поступления грубообломочных продуктов обогащения апатитонелефиновой руды — губе Белой и хвостохранилищу АНОФ-II АО «Апатит». В толще ДО станций I-11, I-17

и I-24 четко выделяются две части — верхняя, более молодая, с высокой влажностью, и нижняя, отложившаяся ранее, с меньшей влажностью (Даувальтер, Кашулин, 2013б). Это распределение влажности можно объяснить историей разработки Хибинских апатитонепелиновых месторождений и поступлением взвешенных веществ различных размеров с предприятий АО «Апатит» (Гигант..., 1999; Моисеенко и др., 1997; Антропогенные модификации..., 2002). Промышленное освоение месторождений на берегах оз. Имандра было начато в 1930-е гг., в 1929 г. был введен в эксплуатацию Апатитовый рудник, в 1931 г. — первая обогатительная фабрика. До 1957 гг. хвосты обогащения (отходы в составе сточных вод) сбрасывались в реку Большая Белая, далее они безо всякой очистки поступали в восточную часть оз. Имандра. На прилегающей акватории, по данным В. В. Чижикова (1980), сформировалась техногенная залежь апатитонепелиновых пород толщиной слоев до 8 м. Впоследствии на водосборе реки Большая Белая была построена серия отстойников, из которых в озеро поступала слегка осветленная часть отходов. Одновременно со строительством АНОФ-II (окончание строительства в 1964 г.) был сооружен огромный отстойник-накопитель площадью 3,4 км² путем отсечения залива (губы Белой) от всего озера (последняя дамба сооружена в 1968 г.). Принцип сброса наиболее осветленной части стоков с высоким содержанием мелкодисперсных взвесей ($\varnothing < 0,2$ мкм) сохранялся. Ежедневно для своих нужд фабрика забирала из озера 400 тыс. м³ чистой воды. Загрязнение Имандры интенсивно продолжалось и в период 1976–1978 гг. В конце 1978 г. было введено частичное оборотное водоснабжение, что позволило снизить объем сброса сточных вод более чем в 2 раза. В 1984–1992 гг. объем сброса находился в пределах 150–180 млн м³/год. Прозрачность воды увеличилась в среднем до 2 м, однако уровень загрязнения оставался очень высоким: сказывался эффект вторичного загрязнения, когда вследствие ветрового взмучивания мелкодисперсные взвеси поднимались со дна и распространялись на большие расстояния.

Разумно в связи с этим предположить, что нижняя часть колонок ДО станций I-11, I-17 и I-24 соответствует времени накопления осадков до строительства отстойника-накопителя (хвостохранилища) АНОФ-II, когда в озеро без очистки сбрасывались хвосты обогащения, более крупные по размерам частиц, чем природный материал, формирующий ДО озера (Даувальтер, Кашулин, 2013б). Поэтому влажность в нижней части колонок меньше на 20–30 %. Верхняя часть колонок накапливалась в результате поступления более тонкодисперсного материала после «осветления» хвостов в отстойнике-накопителе. Необходимо также напомнить, что в 1990-е гг., после прекращения существования СССР, отмечался спад апатитонепелинового производства. Подобное распределение влажности в ДО зафиксировано также и на других станциях Большой Имандры, более удаленных от Белой губы — I-24, I-32 и I-36, куда взвешенные вещества со стоками апатитонепелинового производства поступали длительное время.

Однотипное распределение влажности зафиксировано в колонках ДО станций I-46, I-55 и I-59, расположенных в северо-восточной части Йокостровской Имандры — недалеко от Йокостровского пролива. Осадки на этих станциях можно разделить на три части: нижняя часть с фоновыми природными значениями влажности (85–88 %), далее значения влажности резко уменьшаются (до 61 % на станции I-46), что соответствует времени поступления довольно крупнозернистых взвешенных частиц с апатитонепелинового производства,

и к поверхности ДО влажность постепенно повышается до максимального значения. Минимальные значения влажности, соответствующие поступлению наибольшего количества взвешенных веществ после апатитонепелинового обогащения, отмечаются на разной глубине станций I-46, I-55 и I-59, что говорит о разной скорости осадконакопления на этих станциях.

Максимальная скорость осадконакопления и соответственно наибольшая глубина минимального значения влажности отмечена на станции I-46, находящейся на самом коротком расстоянии от Йокостровского пролива. Здесь после довольно быстрого течения под Йокостровским мостом скорость течения резко падает, образуется своеобразный механический барьер и в относительно спокойных условиях происходит осаждение крупно- и тонкодисперсного материала, поступающего, в том числе и с апатитонепелинового производства. Минимальные значения влажности на станциях I-55 и I-59 зафиксированы примерно на одинаковой глубине — в слоях 5–6 и 7–8 см соответственно. Колонка ДО на станции I-59 отобрана с большей глубины, поэтому скорость осадконакопления здесь немного выше.

Распределение влажности в ДО станций I-64, I-67 и I-75 характеризуется закономерным увеличением значений по направлению к поверхности ДО, хотя и здесь также отмечается незначительное уменьшение влажности до 82 % на станциях I-64 и I-67 (в слоях 2–3 и 7–9 см соответственно) и до 90 % на станции I-75 на глубине 1–2 см. На I-67 — более глубокой из этих трех станций — скорость осадконакопления выше.

Таким образом, было установлено, что влажность ДО может служить своеобразным маркером истории поступления взвешенного материала апатитонепелинового производства. Наиболее четко влияние сброса взвешенного материала проявляется в непосредственной близости от места поступления сточных вод АО «Апатит» — на станциях I-11, I-17 и I-24. Далее по мере распространения потока взвешенных частиц влияние их сброса снижается, но проявляется практически на всех станциях в зоне влияния стоков АО «Апатит».

В поверхностном слое (1 см) ДО оз. Имандра влажность находится в диапазоне от 84 до 97 %. Наименьшие значения влажности зафиксированы в узких акваториях озера (Княжая и Зашеечная губы), вблизи устьев рек (губа Куреньга), а также в зонах влияния стоков промышленных предприятий (Монче-, Белая и Молочная губы и прилегающие акватории). На всех этих частях озера отмечается аккумуляция относительно крупнозернистого материала, характеризующегося низкими значениями влажности. По мере удаления от устьев рек, узких проливов и мест поступления сточных вод происходит увеличение доли тонкодисперсного материала и, следовательно, повышение влажности ДО. Максимальные значения влажности (более 95 %) зафиксированы в местах лавинообразного осаждения тонкодисперсного материала в результате образования механического барьера, например, на акватории вниз по течению от Йокостровского пролива, где происходит, как уже отмечалось, резкое падение скорости течения, в средней части Монче-губы (смешение загрязненных и относительно чистых вод из реки Монче), в южной части Бабинской Имандры (смешение подогретых вод с холодными водами из Кунчаст губы).

Показатель потери веса при прокаливании обычно используется как косвенный показатель содержания органического материала в ДО. Параметр

ППП с некоторой долей условности может применяться при оценке содержания органического углерода (С) в ДО.

Между этими двумя показателями отмечается очень высокая корреляция (Håkanson, Jansson, 1983), их связывает следующее уравнение: $C = 0,48 \text{ ППП} - 0,73$. Для приблизительного определения содержания органического углерода обычно используют уравнение $\text{ППП} = 2 \text{ С}$.

Исследованиями профессора Л. Хокансона установлено, что содержание органического углерода увеличивается с уменьшением ППП и что оно может быть определено по уравнению $\text{ППП} = 2 \text{ С}$ лишь в том случае, когда значение ППП больше 10 %, что характерно для аккумуляционной зоны водоемов (Håkanson, Jansson, 1983).

Высокие значения ППП в донных отложениях объясняются тремя факторами (Даувальтер, 2012):

1) поступлением органического материала в результате антропогенной деятельности (например, от предприятий деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности);

2) высокой продуктивностью органического материала в самом водоеме;

3) восстановительными условиями в ДО, препятствующими разложению органического материала.

Содержание органического вещества в ДО, как и влажность, зависит от гранулометрического состава: чем более дисперсны частицы, слагающие ДО, тем большее количество органического материала сорбируется на поверхности частиц. С ростом размеров частиц уменьшается удельная поверхность частиц, следовательно, и их сорбирующая способность (Horowitz, 1991). Содержание органического вещества в ДО зависит также и от трофности акватории озера, так как на дне озера вместе с минеральными осадками аккумулируются и останки гидробионтов, в первую очередь фито- и зоопланктона. Содержание органического материала в ДО хорошо коррелирует с их влажностью, и часто профили их распределения подобны (Моисеенко и др., 1997). Минерализация органического материала в ДО способствует снижению его содержания с глубиной. Содержание органического материала отражает также и влияние антропогенной деятельности.

Распределение органического вещества (ППП) в толще ДО станций оз. Имандра в зоне влияния стоков АО «Апатит» подобно распределению влажности, что подтверждается высоким значением коэффициента корреляции ($r = 0,79$) между значениями ППП и влажности. Нижняя часть колонки ДО станции I-11 соответствует времени накопления осадков до ввода в строй хвостохранилища АНОФ-II, когда в озеро без очистки сбрасывались хвосты обогащения, более крупные по размерам частиц, чем природный материал, формирующий ДО озера. Значения ППП в нижней части колонки — 4–5 %, в верхней части они увеличиваются до 16 % благодаря поступлению тонкодисперсного материала после «осветления» хвостов в отстойнике-накопителе. Повышению содержания органического материала способствует и поступление хозяйственно-бытовых стоков с очистных сооружений г. Апатиты, которые сначала направляются в реку Жемчужная, а далее в реку Б. Белая и в итоге поступают в губу Белая. Похожая картина распределения величин ППП в ДО отмечается и на других исследованных станциях Большой Имандры (I-17, I-21, I-24 I-32 и I-36). Колонки делятся на две части: нижнюю — с меньшими величинами ППП и верхнюю, где происходит увеличение содержания органического материала,

благодаря его сорбции на более мелких частицах и поступлению органического материала с хозяйственно-бытовыми стоками.

В донных отложениях станций I-46, I-55 и I-59 Йокостровской Имандры, как и в распределении влажности, отмечаются минимальные значения ППП, соответствующие поступлению большего количества взвешенных веществ в составе сточных вод апатитонефелинового обогащения до ввода в строй хвостохранилища. Минимальные величины ППП отмечаются на разной глубине, что, как и в случае с влажностью, говорит о разной скорости осадконакопления на этих станциях. Максимальные скорости осадконакопления характерны для станции I-59, поэтому минимальное значение ППП зафиксировано на этой станции интервале 13–14 см, а на станциях I-59 и I-56 минимальные содержания органического материала отмечены 9–10 и 5–6 см соответственно.

На других станциях Йокостровской Имандры, которые отдалены от Йокостровского пролива на большее расстояние, можно также выделить слои с минимальным содержанием ППП, но диапазон их значений в толще ДО на этих более удаленных от Йокостровского пролива станциях (I-64, I-67 и I-75) меньше. На станции I-75 отмечены максимальные значения ППП по всей колонке (24–28 %), что связано, с тем, что в Тик-губе, относительно мелководной и более прогреваемой по отношению к открытой части Йокостровской Имандры, в спокойных гидродинамических условиях накапливаются тонкодисперсные структуры с высоким содержанием органического материала. Уменьшение ППП в верхней части колонки, вероятно, обусловлено поступлением в последние десятилетия пылевых частиц с рядом расположенного хвостохранилища АНОФ-II.

В поверхностном сантиметровом слое ДО исследуемых станций оз. Имандра зафиксирован диапазон значений ППП — от 12 до 34 %, отличающийся почти в 3 раза. Как было уже отмечено при рассмотрении территориального распределения влажности, проглядывается тенденция уменьшения значений ППП (до 14 %) по мере приближения к месту поступления сточных вод АО «Апатит», где происходит осаждение взвешенных веществ продуктов апатитонефелинового обогащения. Отмечается также и другая тенденция: чем больше минеральных относительно более крупнодисперсных частиц этого обогащения, тем меньшим содержанием органического материала обладают ДО.

В Йокостровской Имандре главным фактором являются условия седиментации: чем более спокойная обстановка складывается для осаждения тонкодисперсного материала, тем больше величина ППП. По мере удаления от Йокостровского пролива содержание органического материала увеличивается до 26 % (в Тик-губе).

В Монче-губе наблюдается увеличение содержания органического материала в ДО (диапазон значений 29–34 %), что, вероятно, связано с высокой трофностью этой акватории озера и поступлением большого количества органического материала в ДО после отмирания фито- и зоопланктона. Интенсивное развитие водорослей (повышение биомассы зеленых и криптофитовых) и зоопланктона (главным образом коловраток) отмечено в районах смешения озерной воды и коммунальных стоков в Монче-губе (Антропогенные модификации..., 2002).

В Бабинской Имандре развитие фито- и зоопланктона гораздо менее интенсивное, чем в Большой и Йокостровской Имандре (Антропогенные модификации..., 2002), что отразилось в значительном уменьшении поступления

органического вещества в ДО после отмирания гидробионтов и снижении величин ППП (до 12 %).

Таким образом, наряду с содержанием приоритетных загрязняющих веществ показана индикаторная роль физических показателей (влажность и потери при прокаливании) ДО субарктического водоема для оценки поступления взвешенного материала горнодобывающих производств при реконструкциях истории загрязнения водоемов и оценке степени их трансформации.

7.3. Фоновые содержания элементов в донных отложениях

Установление фоновых концентраций элементов в ДО является одним из важных вопросов при исследовании загрязнения озер. Чтобы определить интенсивность антропогенной нагрузки на водоем, современные содержания элементов в ДО, как правило, сравниваются с их фоновыми. Для решения этой проблемы существует два подхода:

1) установление основных геохимических фоновых уровней элементов (кларков) с опорой на данные А. П. Виноградова (1962), К. Турекиана и К. Уидфола (Turekian, Wedephol, 1961);

2) определение доиндустриального уровня содержания элемента для каждой колонки ДО (Förstner, 1977).

В первом случае игнорируются все местные особенности формирования ДО, во втором, наоборот, эти особенности подчеркиваются. Для определения степени загрязнения озер первый подход является более приемлемым, потому что изменчивость фоновых значений может быть очень существенной даже внутри одного водоема или однотипных озер. Главным преимуществом данного метода является сокращение объема работ, то есть для изучения антропогенного влияния на водоем достаточно отбора только поверхностного слоя ДО из зон аккумуляции, недостатком — получение менее точных данных по изменению концентраций с течением времени. При исследовании ДО оз. Имандра, как правило, на каждой станции отбирались колонки ДО, поэтому есть возможность определения фонового содержания элементов в каждой колонке. Тем не менее очень важно определить и средние значения фоновых концентраций элементов в ДО для отдельного озера, для озер района, области, чтобы была возможность использования первого подхода в целях экономии средств при проведении химических анализов и оценки экологического состояния водоемов, например, чтобы определить возможность использования данного водоема для водопотребления, рыбозаводства, рекреационных и других целей.

Согласно исследованиям Н. М. Страхова (1954), в основе механизма, контролирующего интенсивность поступления материала, а следовательно, и элементов в озера, лежит чисто геометрический фактор — отношение между площадью водосбора и самим водоемом, но влияние этого фактора осложнено воздействием климата, рельефа и петрографического состава водосборной площади. Н. М. Страховым выявлена закономерность роста относительной площади водосборов с уменьшением размеров озер и их водосборов. Это правило не имеет строго математического характера по вышеназванным причинам, но если принимать во внимание то, что масса сносимого материала в первом приближении пропорциональна площади сноса, можно заключить следующее: интенсивность поступления материала с уменьшением размера озера возрастает.

Для установления интенсивности антропогенной нагрузки на озеро и степени его загрязнения необходимо знать природные концентрации элементов в ДО, которые существовали до любой деятельности человека на берегах озера или его водосбора. Для этого часто используются величины фоновых концентраций элементов в ДО, которые определяются, как правило, в самых нижних глубоких частях колонок ДО. Скорость осадконакопления в озерах Северной Фенноскандии и Мурманской обл. в том числе оценивалась равной примерно 1 мм в год, а диапазон находится в пределах от 0,3 до 1,25 мм/год в озерах, аэротехногенно загрязняемых (Rognerud et al., 1993; Trase..., 1996), 1,5–3,0 мм/год в озерах, загрязняемых стоками промышленных предприятий, например, Куэтсъярви (Даувальтер, 2002; Dauvalter, 2003).

При исследовании состояния ДО оз. Имандра осуществлялся отбор колонок длиной 20–25 см, следовательно, можно предположить, что в нижних слоях отобранных колонок ДО должны быть зафиксированы природные фоновые содержания тяжелых металлов, в том числе никеля и меди. Так как в акваториях поступления большого количества взвешенного материала со стоками промышленных предприятий, главным образом рудников и обогатительных фабрик АО «Апатит», скорость осадконакопления значительно увеличилась, то длины некоторых колонок, возможно, было недостаточно, чтобы отобрать донные отложения из фоновых, доиндустриальных слоев.

Колонки ДО отбирались только в последние тридцать лет, поэтому есть возможность определить фоновые концентрации элементов только по итогам исследований последних лет. В связи с этим при определении средних фоновых концентраций элементов в ДО оз. Имандра некоторые содержания не учитывались, потому что эти значения были явно выше фоновых, например, на станциях, близко расположенных к месту поступления стоков АО «Апатит» (станции в Белой губе I-11, I-17, I-21), комбината «Североникель» (станции в Монче-губе).

В табл. 7.1 показаны величины фоновых концентраций элементов в ДО по результатам исследований 1990-х гг. [опубликованных в (Антропогенные модификации..., 2002), с некоторыми дополнениями и изменениями] и 2000-х гг. (современные), а также среднее содержание элементов в осадочных породах (по А. П. Виноградову, 1962), 50 скандинавских озер (Håkanson, 1980) и 200 малых озер Мурманской обл. [с дополнениями и изменениями по (Даувальтер, Кашулин, 2014)].

Сопоставление средних фоновых содержаний микроэлементов (Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Sr, мкг/г сух. веса), которые показаны в табл. 7.1, в ДО оз. Имандра по результатам исследований 1990-х и 2000-х гг. показало, что по результатам последних исследований 2000-х гг. значения для большинства микроэлементов несколько ниже, что связано, вероятно, с более совершенным оборудованием в последние годы и с более точным определением концентраций микроэлементов при их малых величинах. Например, концентрации кадмия и свинца в 1990-х гг. определялись на пламени, а в 2000-х гг. — в графитовой печи, что значительно уточнило итоги определения содержания этих элементов и средние фоновые концентрации кадмия и свинца; по результатам исследований 2000-х гг., они уменьшились почти на порядок и в 3 раза (с 1,45 до 0,17 и с 14,3 до 5,5 мкг/г для Cd и Pb соответственно).

Таблица 7.1

Средние (X), минимальные (min) и максимальные (max) фоновые значения влажности (H₂O, %) и ППП(%), фоновые концентрации элементов (микроэлементы^{*}, мкг/г, макроэлементы^{**}, %) в ДО оз. Имандра в 1990-е и 2000-е гг., скандинавских озер (СО^{1*}) и малых озер Мурманской обл. (МО^{2*}). ОП^{3*} — среднее содержание в осадочных породах

Параметр	ОП	СО	МО			1990-е гг.			2000-е гг.		
			X	min	max	X	min	max	X	min	max
H ₂ O	–	–	–	–	–	73,7	59,9	84,2	80,4	56,8	91,1
ППП	–	–	24,0	0,9	88,9	12,6	4,7	21,7	13,8	3,6	27,9
Cu [*]	57	28,7	28	2	94	39	28	65	38	13	67
Ni [*]	95	49,7	27	4	101	52	29	161	45	21	105
Zn [*]	80	110,6	94	3	274	97	69	128	92	59	160
Co [*]	20	18,5	13	1	69	14	3	28	19	6	38
Cd [*]	0,3	0,58	0,24	0,01	1,70	1,45	0,86	2,78	0,17	0,05	0,40
Pb [*]	20	34,9	4,4	0,4	17,0	14,3	5,0	25,0	5,5	1,4	12,8
As [*]	6,6	8,6	3,2	0,1	13,7	–	–	–	5,4	1,3	22,9
Hg [*]	0,4	0,12	0,037	0,003	0,112	0,071	0,003	0,190	0,048	0,005	0,154
Cr [*]	100	48,7	49	4	1007	63	32	95	70	16	107
Sr [*]	450	–	49	2	299	38	3	127	79	17	721
Mn ^{**}	0,067	0,086	0,050	0,006	0,447	0,224	0,042	1,175	0,163	0,010	0,719
Fe ^{**}	3,33	2,67	2,43	0,054	1,47	3,21	1,40	6,07	3,34	0,18	14,53
Al ^{**}	10,45	2,6	1,97	0,227	6,76	2,30	1,33	3,44	2,52	1,24	4,26
P ^{**}	0,077	–	0,113	0,006	0,508	–	–	–	0,180	0,060	0,644
K ^{**}	2,28	–	0,159	0,012	1,16	0,156	0,067	0,298	0,194	0,090	0,344
Na ^{**}	0,66	–	0,045	0,004	0,432	0,056	0,023	0,125	0,089	0,027	0,197
Ca ^{**}	2,53	–	0,283	0,005	1,45	0,077	0,019	0,297	0,529	0,130	1,395
Mg ^{**}	1,34	–	0,381	0,025	6,07	0,378	0,185	0,697	0,410	0,212	0,633

Примечания: ^{1*} — Håkanson, 1980; ^{2*} — с дополнениями и изменениями по Даувальтер, Кашулин, 2014; ^{3*} — по Виноградову, 1962. На рис. 7.1–7.8 концентрации элементов указаны в тех же единицах, что и в этой таблице.

По остальным микроэлементам средние фоновые содержания в 2000-х гг. несколько ниже, за исключением Co, Cr и Sr (в 1,4, 1,1 и 2,0 раза значения увеличились). Возможно, это связано с тем, что станции отбора колонок ДО в 1990-х и 2000-х гг. по количеству полностью не совпадали на отдельных акваториях озера, хотя общее количество отобранных колонок отдельно в 1990-х и 2000-х гг. было около 30.

По макроэлементам наблюдается другая картина: средние фоновые содержания в 2000-х гг. несколько увеличились (кроме Mn), причем по Ca почти в 7 раз. Вероятно, это связано с тем, что в 2000-х гг. несколько увеличилось количество станций в Большой Иmandре и на акватории, примыкающей к месту впадения рек, водосборы которых находятся в Хибинских горах, в геологическом отношении относящихся к щелочному массиву с высоким содержанием щелочных и щелочноземельных металлов (K, Na, Ca, Mg и Sr) и Al в коренных горных породах (Минералы Хибинского..., 1999).

Средние фоновые концентрации большинства элементов в ДО 200 малых озер Мурманской обл. немного меньше средних содержаний в оз. Иmandра (см. табл. 7.1). Это, скорее всего, связано с наличием большого количества месторождений и залежей полезных ископаемых и выходов коренных скальных пород на водосборе оз. Иmandра, тогда как водосборы основной части малых озер Мурманской обл. сверху покрыты четвертичными (в основном ледниковыми) отложениями, довольно хорошо промытыми и бедными микроэлементами и щелочными и щелочноземельными металлами и Al, из которых состоят основные породообразующие минералы.

В скандинавских озерах средние фоновые концентрации большинства элементов в ДО сопоставимы с таковыми в оз. Иmandра (табл. 7.1), но содержание халькофильных элементов (Cd, Pb, As и Hg) в них выше. Вероятно, объяснение этому лежит в усовершенствовании аналитического оборудования в последнее время по сравнению с концом 1970-х гг., когда были проведены исследования скандинавских озер (Håkanson, 1980). Использование усовершенствованного аналитического оборудования в последние годы объясняется также и то, что средние фоновые содержания анализируемых элементов в донных отложениях оз. Иmandра, по итогам последних исследований, ниже, чем в 1990-х (табл. 7.1).

Материал, образующий ДО озер, поступает из водной толщи и приносится с территории водосбора (аллохтонный), а также и образуется в самом озере (автохтонный). В то же время ДО в результате дальнейших преобразований и диагенетических процессов образуют осадочные горные породы. Поэтому ДО водоемов (в том числе и озер) можно рассматривать как связующее звено между гидро- и литосферой. Академик А. П.Виноградов (1962) определил среднее содержание элементов в осадочных горных породах на основе анализа глин и сланцев. Анализируемые нами донные отложения по гранулометрическому составу представляют собой глинистые илы, то есть очень близки к глинам и сланцам, поэтому содержание элементов в ДО водоемов разумно сопоставлять с их содержанием в осадочных горных породах. Большинство элементов в осадочных горных породах в среднем находится в большем количестве, чем в фоновых слоях ДО оз. Иmandра (см. табл. 7.1). Вероятно, это связано с тем, что отложения состоят не только из минеральных, но и из органических веществ (в оз. Иmandра до 30 %), которые таким образом «разбавляют» общее содержание элементов. Вместе с тем средние фоновые концентрации марганца в ДО больше,

а железа подобны их содержанию в осадочных горных породах. Относительное обогащение этими металлами связано с особыми геохимическими условиями в ДО оз. Имандра, в первую очередь с окислительно-восстановительными, при которых идет образование железомарганцевых конкреций (Даувальтер, Ильяшук, 2007; Manganese..., 2011) и пирита (сульфида железа) (Нерадовский и др., 2009) в окислительной обстановке. Примерно в равных количествах в ДО оз. Имандра и осадочных породах отмечено также и содержание других элементов — кобальта и мышьяка, чутко реагирующих на изменение окислительно-восстановительных условий (табл. 7.1), что, возможно, связано с образованием в ДО минералов этих элементов.

Таблица 7.2

Факторная модель химического состава фоновых ДО оз. Имандра

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина	-0,042	0,680	0,201
Влажность	0,882	-0,076	0,094
ППП	0,605	-0,386	-0,359
Cu	-0,704	0,262	-0,557
Ni	-0,718	0,050	0,064
Zn	0,038	-0,120	-0,747
Co	-0,261	0,773	-0,473
Cd	0,189	-0,008	-0,786
Pb	-0,014	-0,205	-0,372
Mn	-0,060	0,696	0,109
Fe	0,072	0,884	0,151
Sr	-0,941	-0,145	-0,021
Cr	0,537	0,494	-0,419
Al	-0,941	-0,045	0,075
As	-0,097	0,690	0,213
Hg	-0,433	-0,067	-0,131
P	-0,953	-0,045	-0,048
K	-0,964	-0,068	0,041
Na	-0,944	-0,136	0,009
Ca	-0,975	-0,127	-0,010
Mg	-0,240	0,456	-0,086
Вес фактора, %	40,2	17,2	15,0

Для определения факторов, которые более всего влияют на формирование химического состава фоновых ДО оз. Имандра, проведен факторный анализ (табл. 7.2). Первый фактор, имеющий больший вес (40 %), объединяет физические параметры донных отложений (влажность и ППП), зависящие в первую очередь от гранулометрического состава, и элементы, образующие залежи и месторождения (медно-никелевых и апатитонепелиновых руд) и содержащиеся в повышенных

содержаниях в породообразующих минералах горных пород, слагающих водосбор оз. Имандра, — тяжелые металлы Cu и Ni (Монче-тундры), щелочноземельные и щелочные металлы K, Na, Sr, Ca, а также Al и P (Хибинский щелочной массив). Во второй фактор (вес 17 %) входят элементы — Fe, Mn, Co и As, чутко реагирующие на изменение физико-химических условий, существующих в ДО, о чем речь шла ранее, а также такой параметр, как глубина озера, от которого, собственно, и зависят геохимические условия в толще воды и ДО. Только два тяжелых металла — Zn и Cd имеют значимые коэффициенты в третьем факторе (вес 15 %), что, вероятно, также связано с их повышенным содержанием в горных породах, слагающих водосбор озера.

7.4. Реконструкция осадконакопления донных отложений как отражение динамики качества вод

Исследование химического состава толщи ДО позволяет восстановить динамику качества воды и ДО для отдельных озер, базируясь на определении фоновых значений содержания различных элементов и изменений их поступления в течение длительного периода времени. Эти исследования весьма актуальны для территорий с высокоразвитой горнопромышленной индустрией, где наблюдается аномальное распределение элементов вследствие геохимических особенностей, и антропогенным влиянием на них (Förstner, Wittmann, 1981).

Спокойные, ненарушенные места аккумуляции ДО, скорее всего, содержат исторические записи прошлых условий (климатических, геохимических), существовавших на водосборе водоема. Если могут быть найдены и исследованы достаточно большие по площади и стабильные во времени места осадконакопления (в которых не происходит либо физических, либо химических изменений), то исследователь сможет выявить химические изменения во времени и станет возможным установить фоновые значения для данной территории, которые можно будет сравнить с существующими условиями.

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

Озеро Имандра более 90 лет загрязняется промышленными стоками предприятий и коммунально-бытовыми водами населенных пунктов, что способствовало значительным преобразованиям химического состава ДО. Сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН за 30 лет на оз. Имандра было отобрано более 60 колонок ДО. Из всего этого многообразия в последнее десятилетие было выбрано 8 колонок, предназначенных для описания динамики аккумуляции исследуемых элементов в ДО озера.

Выбранные станции находятся вблизи основных источников загрязнения, расположенных на берегах Большой Имандры (губы Монче, Куреньга, Белая), — комбинаты «Североникель» КГМК, АО «Олкон» и АО «Апатит» — в транзитной зоне распространения потоков загрязнения со стоковыми течениями (центр

Йокостровской Имандры, биостанция, Зашеечная губа), в месте поступления подогретых вод Кольской АЭС (Молочная губа) и в наименее загрязненной акватории (губа Уполокша).

Самые значительные преобразования химического состава в последние 60–80 лет произошли в толще донных отложений северного плеса Большая Имандра. В поверхностных слоях ДО (по сравнению с глубокими фоновыми) губы Монче происходит лавинное увеличение концентраций всех исследуемых тяжелых металлов. Концентрации Ni увеличились на три порядка — с 50 до 30 000 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. 7.1). Концентрации Cu здесь возросли на два порядка — с 50 до 6000 мкг/г (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 металлов (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 последнего в самом верхнем слое снизилась в 3 раза. Заметное увеличение содержания большинства тяжелых металлов происходит на глубине 7 см ДО, и это, скорее всего, 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, с учетом того, 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, в поверхностном 1-см слое концентрации Fe вернулись на прежний доиндустриальный уровень, а Mn даже стали меньше в 2 раза (рис. 7.1). 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 $(Fe,Ni)_9S_8$, халькопирит $CuFeS_2$, кобальтин $(Co,Ni)AsS$, никелин $NiAs$, галенит PbS , сфалерит ZnS , хромит $FeCr_2O_4$ и др. (Mineralogy..., 1999), то есть в их составе, помимо других металлов, присутствует Fe.

Поведение и содержание железа и марганца зависит 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 комплексообразования, например, растворимость гидроксида двухвалентного железа на 4 порядка выше растворимости гидроксида железа трехвалентного. Растворимость гидроксидов железа зависит и от концентрации ионов водорода, например, растворимость гидроксида трехвалентного железа при уменьшении pH с 8 до 6 увеличивается также на 4 порядка (Беус и др., 1976).

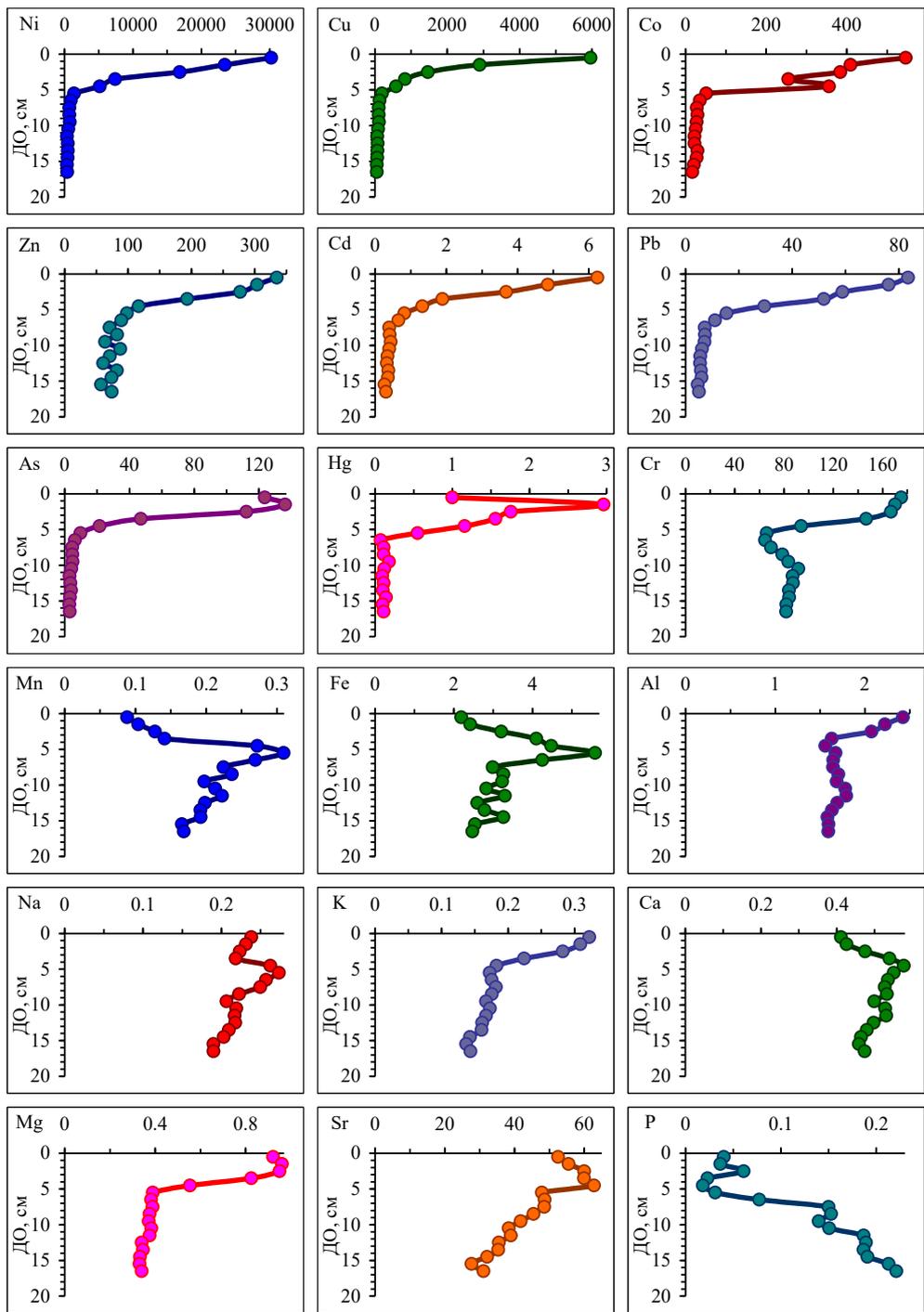


Рис. 7.1. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО Монче-губы

На границе между кислородными и бескислородными условиями (то есть окислительной и восстановительной обстановки) образуется окислительно-восстановительный геохимический барьер (Перельман, 1983), происходит

изменение степени окисления Fe и Mn и осаждение их оксидов и гидрооксидов в виде железомарганцевых конкреций. Первые находки ЖМК в ДО оз. Имандра были описаны в одной из наиболее ранних работ, посвященных изучению озера (Рихтер, 1934). Находки ЖМК в начале 2000-х гг. были отмечены сотрудниками ИППЭС в средней части Монче-губы на глубине 15 м (Даувальтер, Ильяшук, 2007). Найденные конкреции представляют собой железомарганцевую рудную корку коричневого цвета толщиной до 10 мм, локализованную 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 кислорода происходит миграция Mn и Fe из ДО в водную толщу, и летом, когда наблюдается нормальное насыщение воды кислородом, наоборот, металлы переходят в окисные формы, выпадают в осадок и осаждаются на дно (Моисеенко и др., 1997). В результате редокс-цикла Mn и Fe еще долгое время могут находиться в повышенных концентрациях в верхних слоях ДО (Моисеенко и др., 1997, 1998; Даувальтер и др., 1999; Миграция..., 1999).

По направлению к поверхности ДО Монче-губы наблюдается 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. 7.1). Исключением является Ca, максимальные значения которого отмечены на глубине 5 см (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 Монче-губы его содержание постоянно снижается, в поверхностных слоях оно почти на порядок меньше, чем в глубоких фоновых (рис. 7.1).

В губе Куреньга, как и в Монче-губе, происходит рост содержания ТМ (за исключением Zn) по направлению к поверхности ДО (рис. 7.2), что связано с деятельностью как АО «Олкон», так и комбината «Североникель», сточные воды которого из Монче-губы достигают самой северной оконечности озера (губа Куреньга) с помощью нагонных (летом) и компенсационных (главным образом зимой) течений. По мере распространения течений от места поступления основной части тяжелых металлов от комбината «Североникель» их высокие концентрации разбавляются, поэтому в поверхностных слоях ДО губы Куреньга содержания этих металлов более чем на порядок меньше, чем в Монче-губе. Для Co, PbAs и Hg отмечается поверхностный максимум, тогда как для Ni, Cu и Cd — приповерхностный максимум содержания. Заметный рост содержания тяжелых металлов в ДО губы Куреньга отмечается на глубине от 4 до 6 см, значит, скорость осадконакопления на этой акватории немного меньше, чем в Монче-губе.

Наряду с ростом концентраций тяжелых металлов, в ДО губы Куреньга по направлению к их поверхности увеличиваются содержания 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 Оленегорского ГОКа, разрабатывающего и обогащающего магнетит-гематитовые кварциты (рис. 7.2). Максимальные концентрации Mn и Fe наблюдаются на глубине 3 и 5 см соответственно, в поверхностных слоях содержания этих металлов снижены вследствие ввода с 1975 г. 100 %-го оборотного водоснабжения, позволившего сократить сброс стоков ГОКа. Вместе с тем концентрации этих металлов не вернулись на прежний доиндустриальный уровень, потому что периодически возникают ситуации, когда загрязняющие вещества продолжают

поступать из хвостохранилища Оленегорского ГОКа. Как было сказано выше, поведение и распределение марганца и железа зависит от кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий в водной толще и ДО.

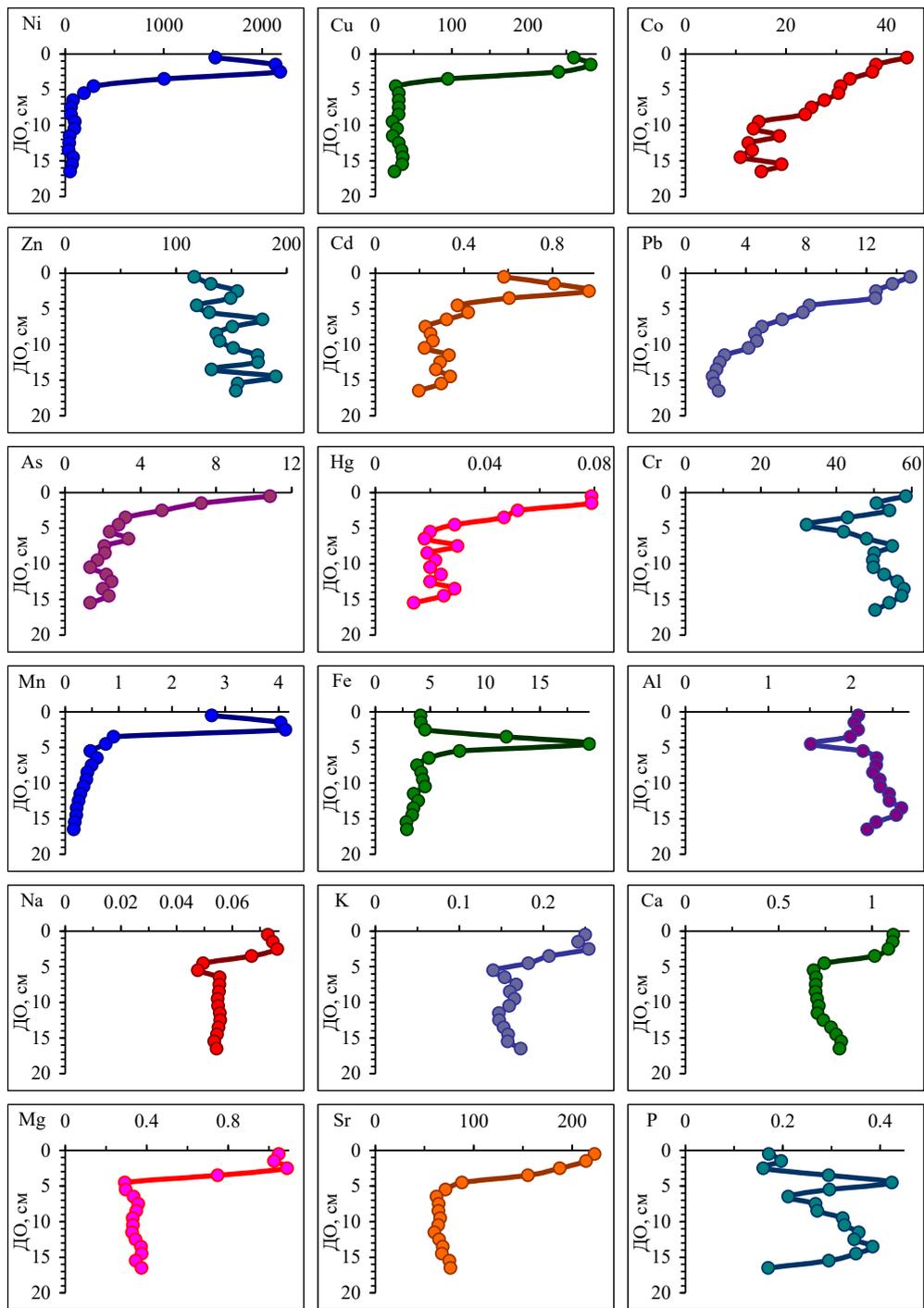


Рис. 7.2. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Куреньга

Как установлено предыдущими исследованиями (Даувальтер, Ильяшук, 2007), окисление растворенного оксида Fe^{2+} до нерастворимого Fe^{3+} происходит быстрее, чем окисление Mn^{2+} до Mn^{4+} . Поэтому максимальные содержания железа, как правило, отмечаются на большей глубине ДО, чем марганца, что и зафиксировано в распределении этих металлов в ДО губы Куреньга (рис. 7.2).

Все исследуемые щелочные и щелочноземельные металлы увеличивают свои концентрации по направлению к поверхности ДО губы Куреньга, что связано с разработкой Оленегорских месторождений железистых кварцитов (рис. 7.2), в состав горных пород которых входят алюмосиликаты с высоким содержанием щелочных и щелочноземельных металлов. Увеличение содержания этих металлов (в 1,5–3,0 раза), как и ТМ, в ДО губы Куреньга отмечается, на глубине 4–5 см, что говорит о параллельности поступления тяжелых и щелочных и щелочноземельных металлов в повышенных концентрациях в данную акваторию озера.

Большие вариации величин влажности, потерь при прокаливании и исследуемых элементов наблюдаются в ДО станций, ближе расположенных к месту поступления грубообломочных продуктов обогащения апатитонефелиновой руды — губе Белой и хвостохранилищу АНОФ-II АО «Апатит». В толще ДО станций Белой губы (рис. 7.3) четко выделяются две части — верхняя, более молодая, с высокими значениями влажности, ППП и большей части металлов и Р, и нижняя, отложившаяся до начала горнодобывающей и перерабатывающей деятельности на водосборе оз. Имандра — с меньшими значениями этих показателей. Это распределение исследуемых элементов (а также влажности и ППП) можно объяснить историей разработки Хибинских апатитонефелиновых месторождений.

Влияние стоков предприятий АО «Апатит» можно обнаружить в высоких концентрациях элементов, присутствующих в апатитонефелиновых рудах и во вскрышных породах (рис. 7.3). Это, прежде всего, элементы — Са, Р, Na, К, Al, содержащиеся собственно в минералах апатите и нефелине, а также сопутствующие им щелочноземельный Sr и редкоземельные элементы, в настоящей работе не исследуемые, но ранее подробно описанные по результатам исследований геохимической миграции элементов в оз. Имандра (Моисеенко и др., 1997; Даувальтер и др., 1999). На формирование химического состава донных отложений южной части плеса Большой Имандры также оказывают влияние 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) (Накопление..., 2000).

За 90-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 исследуемых станций Большой Имандры четко отмечается приповерхностный максимум до 2,3 мкг/г на глубине 7–9 см (рис. 7.3), что практически на два порядка больше средних фоновых концентраций этого чрезвычайно токсичного халькофильного элемента в ДО озер Мурманской обл. (Некоторые аспекты..., 2013; Selected..., 2017; Dauvalter,

Kashulin, 2018). Ниже максимальных содержаний на 2–3 см по глубине ДО отмечаются содержания Hg, которые сопоставимы со средними фоновыми концентрациями Hg в донных отложениях озер Мурманской обл.

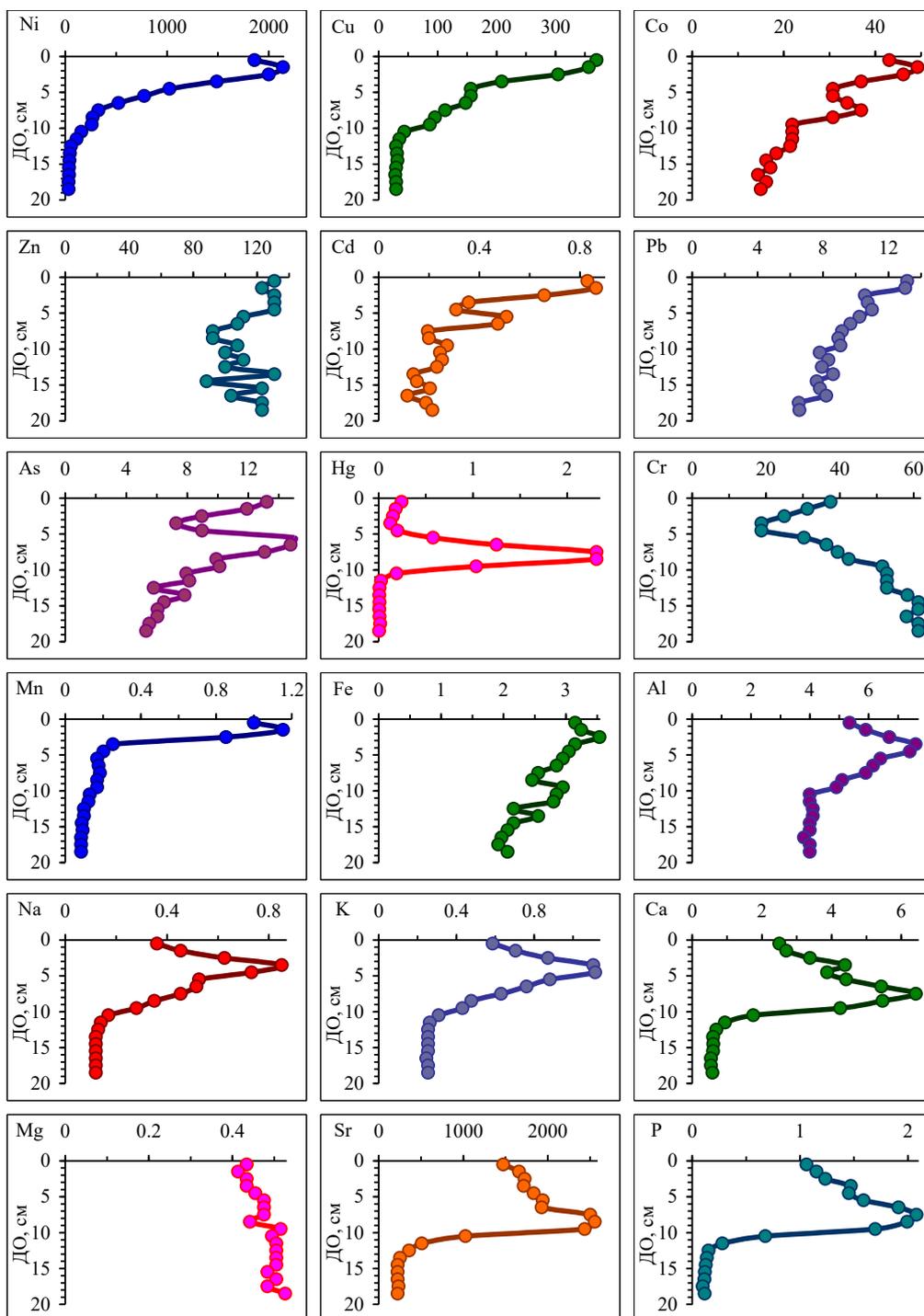


Рис. 7.3. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Белой

Сопоставление с вертикальными профилями других загрязняющих элементов приводит к выводу о том, что увеличение концентрации Hg в оз. Имандра по времени совпадает с началом поступления элементов со стоками АО «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 тяжелых металлов — Ni и Cu. Можно предположить, что максимальное поступление Hg происходило в 1930–1940-е гг. (рис. 7.3).

При проведении взрывных работ на первых этапах разработки апатитофелиновых месторождений в капсуль-детонаторах использовалась гремучая ртуть [ртутная соль фульминовой (гремучей) кислоты $\text{Hg}(\text{CNO})_2$]. Во время Великой Отечественной войны на базе комбината «Апатит» работал цех по изготовлению зажигательных фосфорных бомб, в которых в качестве капсуля-воспламенителя также 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 утилизируют, а выбрасывают на свалки или отвалы рудников. Ртуть содержится в медицинских термометрах (в одном термометре примерно 2 г Hg). До середины XX века она широко применялась в манометрах, для проведения химических анализов, например количественного определения аммиака (реактив Несслера), и других целей. Вплоть до 1970-х гг. ее соединения 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 металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb) в ДО центральной части Йокостровской Имандры отмечается два подповерхностных максимума — на глубинах 2 и 5 см (рис. 7.4). 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 тяжелых металлов в поверхностном 1-см слое ДО может быть связано с уменьшением выпуска продукции и, как следствие, со снижением поступления этих металлов в озеро в составе сточных вод металлургического предприятия. Концентрации большинства из них 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 вместе с тем их концентрации к поверхности ДО Йокостровской Имандры значительно увеличиваются относительно фоновых содержаний, например, Ni более чем в 50 раз, Cu — 6, Pb — 8, Cd — 5 и Co — 4 (рис. 7.4).

В вертикальном распределении концентраций ртути в ДО Йокостровской Имандры зафиксирован «классический» профиль, который характерен для приоритетных загрязняющих тяжелых металлов: 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 нее отмечается рост содержания на глубине 5 см, зафиксированный для других ТМ. Превышение фоновых концентраций ртути начинается с глубины 7 см (рис. 7.4), как и у большинства ТМ. Максимальное содержание As отмечено на глубине 8 см ДО Йокостровской Имандры (рис. 7.4).

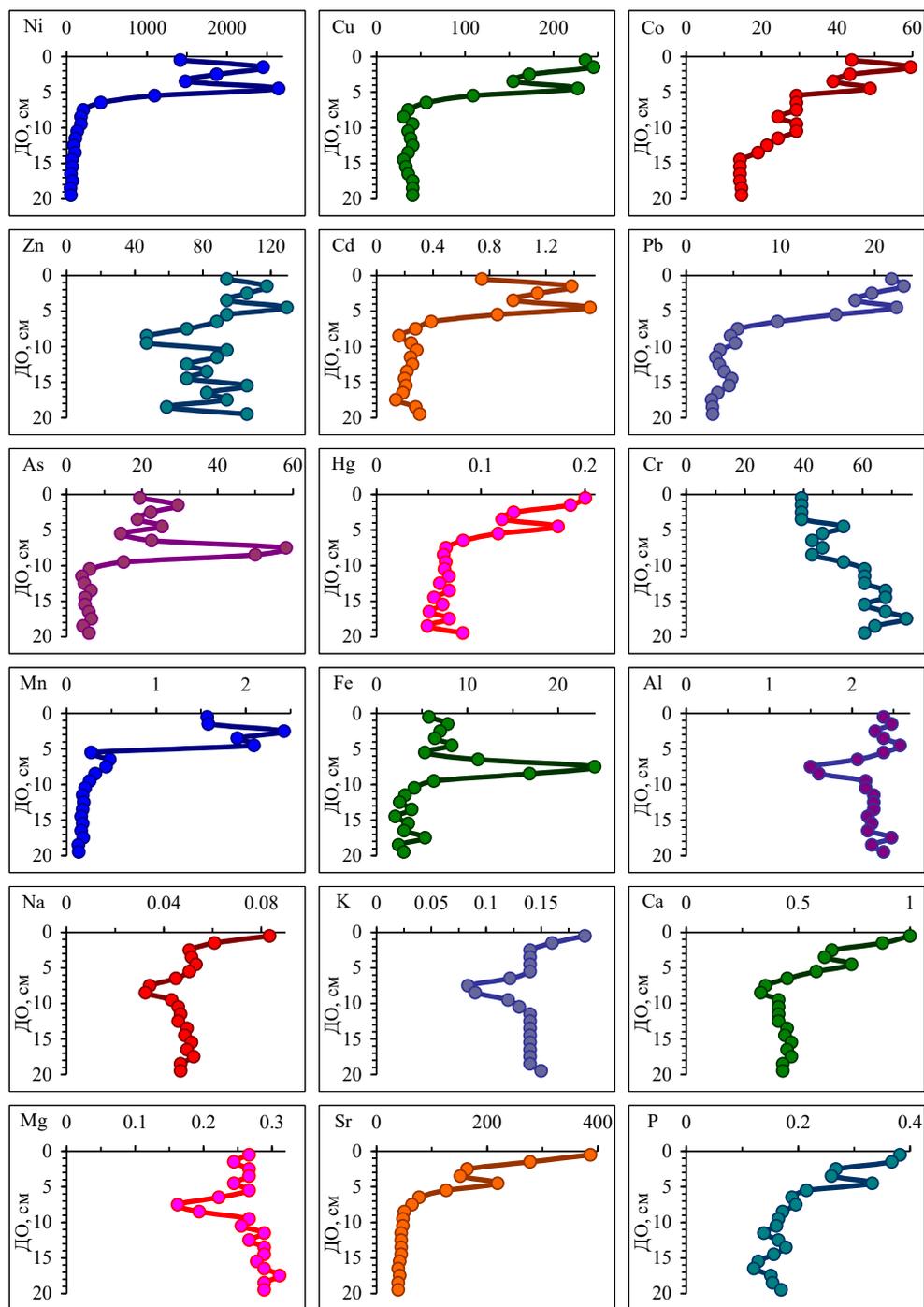


Рис. 7.4. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО Йокостровской Имандры

По направлению к поверхности ДО Йокостровской Имандры наблюдается увеличение содержаний Mn и Fe до максимальных значений 2,5 и 24 %, что в 18 и 8 раз больше, чем концентрации в самых нижних фоновых слоях ДО

соответственно (рис. 7.4). Это связано как с влиянием сточных вод промышленных предприятий на берегах озера, так и с изменениями физико-химических условий в толще воды и ДО. В пользу последнего высказывания говорит то, что максимальные содержания Fe в ДО отмечаются на большей глубине ДО Йокостровской Имандры (8 см), чем Mn (3 см) (рис. 7.4).

В распределении щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca и Sr) отмечается общая тенденция увеличения содержания по направлению к поверхности ДО Йокостровской Имандры (рис. 7.4), что связано с влиянием сточных вод промышленных предприятий горнодобывающей и горно-металлургической отрасли, главным образом АО «Апатит».

Минимальные содержания щелочных и щелочноземельных 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. Подобная закономерность отмечена в распределении величин влажности и содержания органического материала. 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, с учетом времени, прошедшего с возведения отстойника-накопителя АНОФ-II (более 40 лет) и глубины минимальных содержаний щелочных и щелочноземельных металлов и алюминия.

Комплексный мониторинговый полигон (КМП) КНЦ РАН (биостанция) размещен в небольшой губе Йокостровской Имандры недалеко от Йокостровского пролива (с юга ограничена Леонтьевым наволоком), 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 у всех исследованных элементов — как тяжелых, так и щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P — повышены содержания по направлению к поверхности ДО биостанции (рис. 7.5), что является следствием загрязнения озера сточными водами в первую очередь комбината «Североникель» и АО «Апатит». Максимальные концентрации 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 апатитонефелинового 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. 7.3). Самый большой рост концентраций в поверхностных слоях относительно фоновых значений, отмеченных в наиболее глубоких частях колонки ДО биостанции, зафиксирован для Sr (более чем в 70 раз), Ni (в 35 раз), Ca (в 30 раз), Hg (в 22 раза), Cu (в 10 раз) P (в 9 раз) Na (в 6 раз) (рис. 7.5).

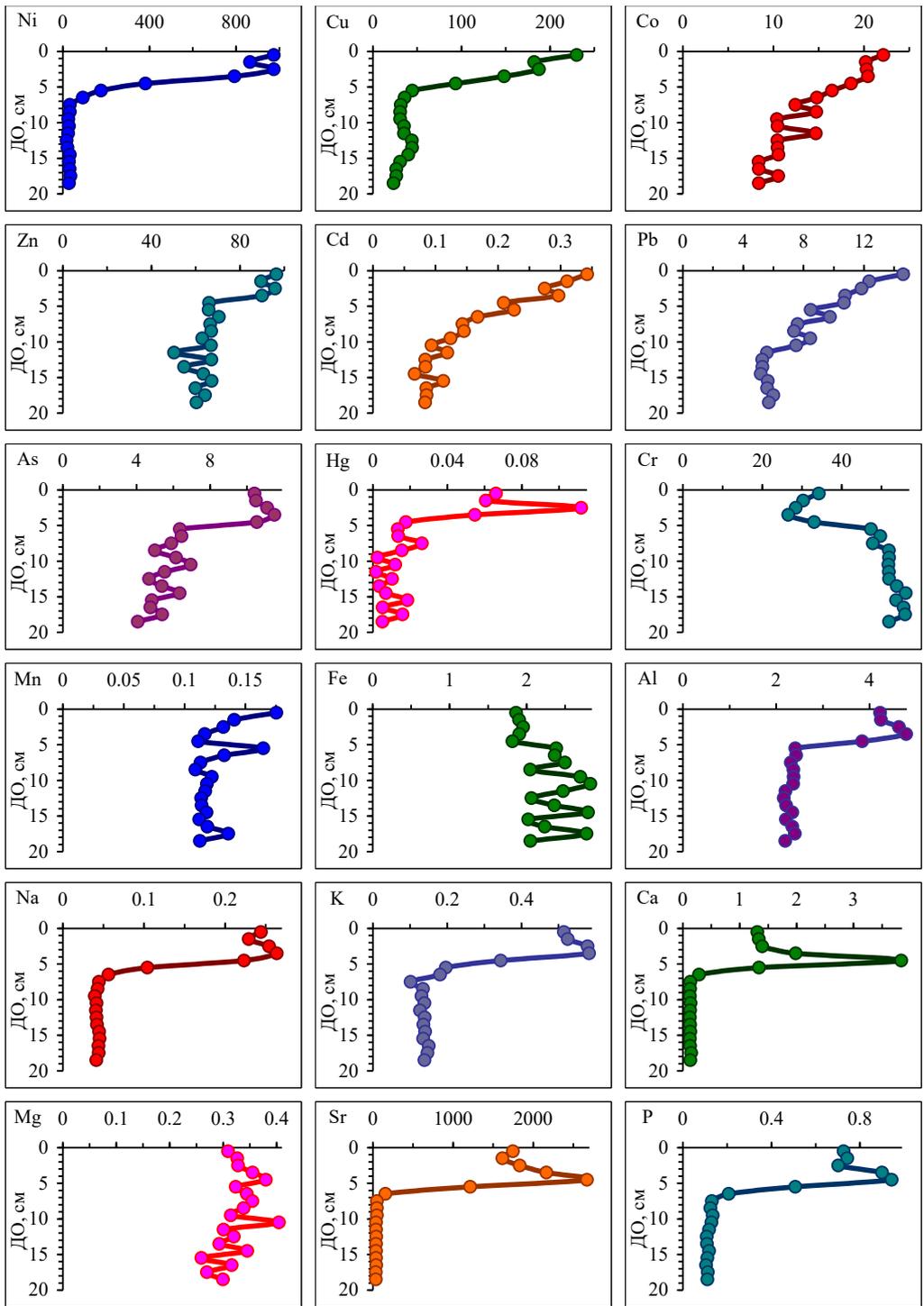


Рис. 7.5. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО биостанции

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 и не осевшего на дно водоема.

На этой акватории, вследствие снижения стоковых скоростей, перед истоком реки Нива создается механический геохимический барьер, который способствует интенсификации осадконакопления. В ДО Зашеечной губы, к их поверхности, был зафиксирован постепенный рост содержания, а также максимальные концентрации в поверхностном 1-см слое ДО всех исследуемых ТМ (рис. 7.6). Это отражает влияние стоков промышленных предприятий в оз. Имандра, главным образом комбината «Североникель», и 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 раз), As (в 11 раз), Pb (в 7 раз), Cu (в 4 раза), Hg и Co (в 3 раза). Похожая с тяжелыми металлами ситуация наблюдается относительно щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P — рост содержаний по направлению к поверхности ДО, что связано с влиянием как сточных вод АО «Апатит», так и работающего до недавнего времени Африкандского рудоуправления института «Механобр». Максимальный рост отмечено для Sr (в 18 раз), Ca (в 9 раз), P (в 3,5 раза), Na (в 3 раза) (рис. 7.6).

Влияние изменений физико-химических условий в толще воды и ДО Зашеечной губы сказалось в наличии подповерхностных максимумов содержания Mn и Fe на глубине 2 и 5 см ДО соответственно (рис. 7.6). В толще ДО Зашеечной губы зафиксировано самое большое содержание железа в оз. Имандра — 32 % на глубине 5 см, а это, в свою очередь, дает возможность образования в ДО таких аутигенных минералов, как пирит, либо способствует другому минералообразованию в виде железомарганцевых конкреций, описанных ранее (Даувальтер, Ильяшук, 2007; Нерадовский и др., 2009).

В Молочную губу Бабинской Имандры сбрасываются подогретые на 10–12 °C воды, используемые для охлаждения агрегатов Кольской атомной электростанции и забираемые из Глубокой губы Йокостровской Имандры. Поэтому акватория Молочной губы, наряду с тепловым загрязнением, испытывает также и влияние относительно более загрязненных вод Йокостровской Имандры (рис. 7.7). Вследствие этого в колонке ДО Молочной губы наблюдается рост концентраций в поверхностных слоях Hg почти в 6 раз (с 0,01 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, Cr, щелочных и щелочноземельных металлов, Al и P по направлению к поверхности ДО (рис. 7.7). Повышенные содержания Ni и Cu отмечены 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. 7.7). Вероятно, это сопряжено 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.

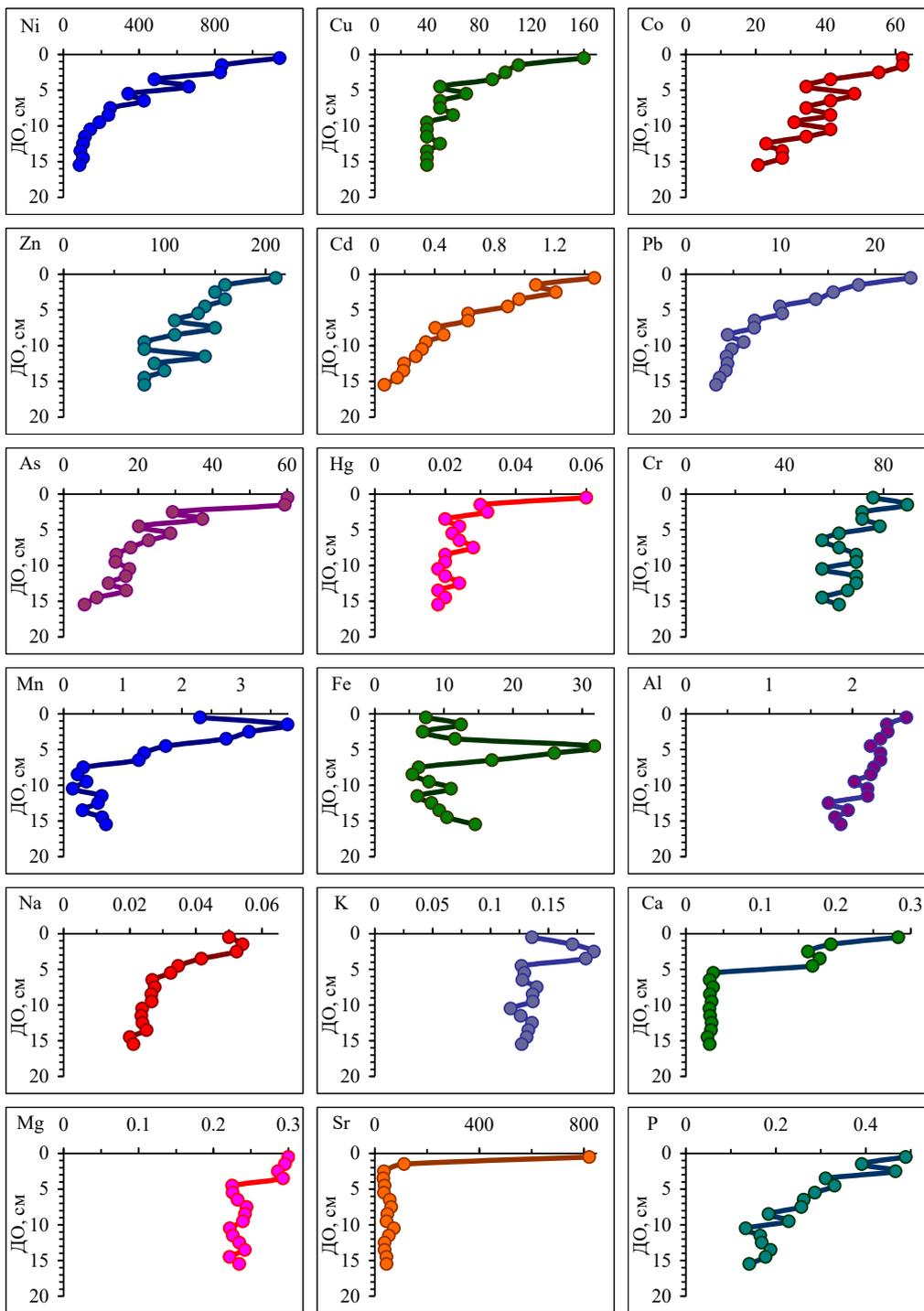


Рис. 7.6. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДГО губы Зашечной

Губа Уполокша, как самая западная акватория Бабинской Имандры и озера в целом, не подвержена прямому влиянию сточных вод предприятий

горно-металлургического комплекса. Но, несмотря на это, здесь отмечен рост концентраций всех исследованных тяжелых металлов к поверхности ДО (рис. 7.8) вследствие аэротехногенного загрязнения водосбора Бабинской Имандры.

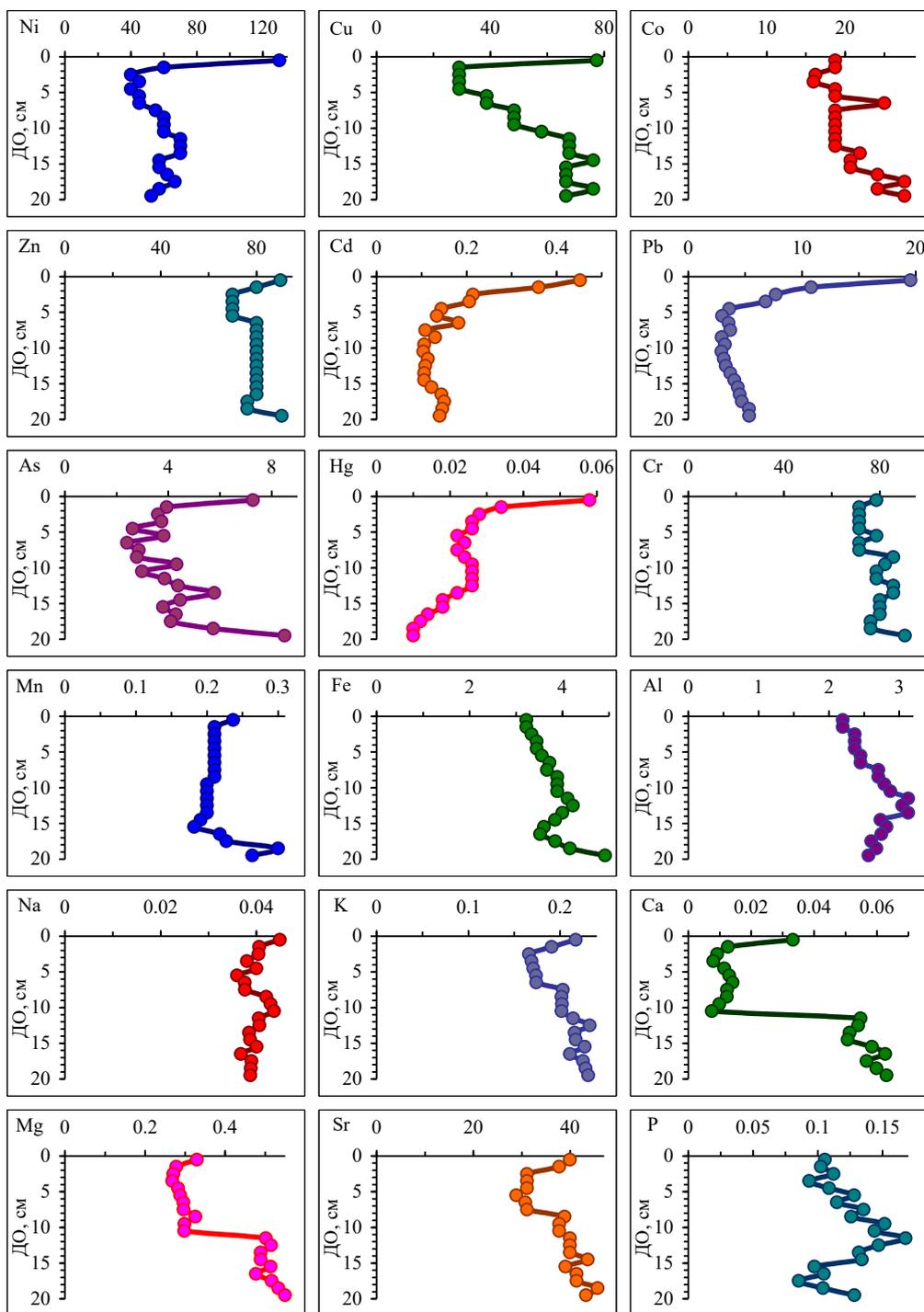


Рис. 7.7. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДО губы Молочной

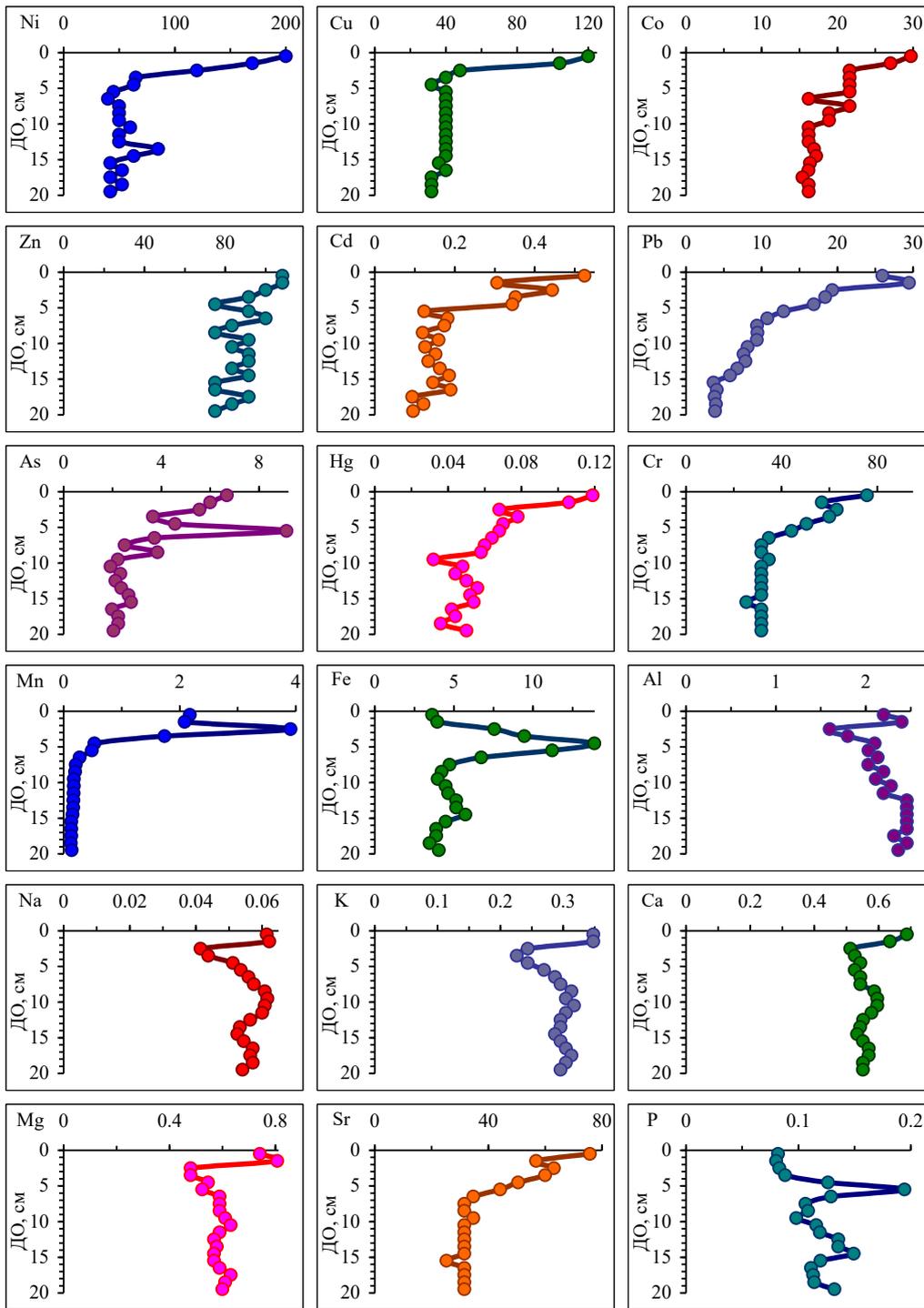


Рис. 7.8. Вертикальное распределение концентраций элементов в ДГО губы Уполокша

Вероятно также поступление загрязняющих веществ через каналы Кольской АЭС и протоку между Йокостровской и Бабинской Имандрой — 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. 7.8), и превышение над фоновыми значениями в самых глубоких частях колонки наибольшие для Pb (в 7 раз), Ni (в 5 раз), Cu и Cd (в 4 раза).

Металлы Fe и Mn, чутко реагирующие на изменение окислительно-восстановительных условий, наибольшие содержания показывают на глубине 3 и 5 см ДО губы Уполокша соответственно, и, как было отмечено на других станциях, максимальное содержание Fe фиксируется, как правило, на большей глубине ДО, вследствие того, что образование труднорастворимых соединений Fe³⁺ происходит при меньших величинах Eh. Содержание Mn к поверхности ДО увеличивается более чем в 30 раз, Fe — в 4 раза. Повышение содержания щелочных и щелочноземельных металлов отмечено в поверхностных 2 см ДО, а минимум — в слое 2–4 см (рис. 7.8).

Как было указано выше в описании результатов исследований, распределение элементов в колонках ДО оз. Имандра имеет общие закономерности формирования химического состава. Для выявления факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава ДО, были проведены факторный (табл. 7.3) и корреляционный (табл. 7.4) анализы с использованием пакета Statistica (Version 6.1).

Таблица 7.3

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

Таблица 7.4

Коэффициенты линейной корреляции между концентрациями элементов в толще ДО 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	-0,04	-0,01	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	-0,23	0,00	-0,02	0,10	-0,07	-0,05	-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	

Примечание. Здесь и в табл. 7.3: *h* — глубина слоя ДО; H₂O — влажность ДО; ППП — величина потерь при прокаливании. Отмеченные полужирным выделением корреляции значимы на уровне $p < 0,05$ ($N = 150$).

При их проведении учитывались результаты по 8 описанным выше колонкам ДО, так как они являются наиболее представительными из всего многообразия отобранных проб ДО за 30-летнюю историю исследований озера сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН.

Озеро Имандра, как было отмечено ранее, несмотря на довольно значительные размеры и различную удаленность исследуемых акваторий от основных источников загрязнения, в различной степени подвержено влиянию сточных вод и атмосферных выбросов горных и металлургических предприятий, в первую очередь «Североникель», АО «Апатит», АО «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 донных отложений озера, в толще которых наблюдается рост величин влажности и органического материала (ППП) и концентраций по направлению к поверхности ДО практически всех исследованных элементов, что проявляется в достоверном высоком отрицательном значении коэффициента корреляции содержания элементов с глубиной слоя ДО (табл. 7.4), исключением из этого списка являются Cr, Al и Mg.

Всем исследованным тяжелым металлам присущи высокие значения коэффициентов корреляции с влажностью и содержанием органического материала, т. е. параметрами ДО, которые, тесно связаны с гранулометрическим составом ДО (табл. 7.4). В монографии (Даувальтер, 2012) показано, что с увеличением содержания тонкодисперсных частиц и органического материала повышается 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 тяжелые металлы имеют также высокие значения коэффициентов корреляции между собой (табл. 7.4), что говорит в пользу предположения о том, что поступление тяжелых металлов 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 тяжелыми металлами, главный источник поступления которых — комбинат «Североникель», но и со всеми щелочными и щелочноземельными металлами, Al и P (табл. 7.4), которые поступают в оз. Имандра не только в результате естественных процессов выветривания и эрозии слагающих водосбор озера горных пород, но и в составе горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, в основном АО «Апатит». Последнее утверждение доказывается высокими достоверными коэффициентами корреляции между всеми щелочными и щелочноземельными металлами (за исключением Mg, корреляция которого недостоверна с Sr, Al и Ca), а также Al и P. Марганец и железо, несмотря на то, что их оксиды и гидроксиды являются очень важными сорбентами

загрязняющих веществ и тяжелых металлов (Даувальтер, 2012), 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. 7.4). Зависимость распределения содержания Mn и Fe обусловлена не только наличием источника поступления этих металлов в составе сточных вод промышленных предприятий (главным образом, АО «Олкон»), но и влиянием физико-химических условий (в основном окислительно-восстановительной обстановки), что наглядно было показано в профилях распределения Mn и Fe в толще ДО исследованных станций озера (см., например, рис. 7.2, 7.4, 7.6, 7.8).

Факторным анализом (табл. 7.3) выявлены определяющие факторы, влияющие на формирование химического состава ДО, главным образом, это воздействие промышленных предприятий и коммунально-бытовых стоков на территории водосбора озера.

По всем исследуемым ТМ (Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg) отмечаются высокие отрицательные значения коэффициента в первом факторе (табл. 7.3), вес этого фактора имеет подавляющее преимущество (36 %). Он проявляется и в положительном коэффициенте «глубины слоя» ДО, то есть с увеличением глубины концентрации элементов снижаются. Он также подтверждает неоднократно выдвигаемое предположение о том, что сточные воды и атмосферные выбросы горно-металлургических предприятий, главным образом комбината «Североникель», являются одним из главных факторов распределения тяжелых металлов 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 деятельность АО «Апатит» влияет на формирование распределения щелочных и щелочноземельных металлов (за исключением Mg), Al и P, т. е. элементов, входящих в состав таких минералов, как апатит и нефелин.

Третьим фактором, со сравнительно небольшим весом (11 %), являются, вероятно, геохимические (физико-химические) условия, контролирующие процессы формирования химического состава донных отложений. В пользу этого предположения говорят высокие коэффициенты «глубины слоя» и влажности ДО, а также Mn и Fe — металлов, чутко реагирующих на изменение физико-химических условий в толще воды и ДО, в первую очередь окислительно-восстановительной обстановки. Вероятно, на распределение этих металлов в толще ДО оз. Имандра, повлияла деятельность АО «Олкон», особенно на начальном этапе деятельности предприятия до середины 1970-х гг., когда было введено 100 %-е обратное водоснабжение.

Таким образом, геохимический состав ДО оз. Имандра за последнее столетие 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 горнодобывающие, горно-металлургические и горно-перерабатывающие предприятия, то есть комбинат «Североникель», АО «Апатит» и АО «Олкон».

7.5. Территориальное распределение элементов в поверхностном слое донных отложений

Содержание элементов в поверхностном 1-см слое ДО отражает современное состояние экосистемы озера и антропогенную нагрузку на озеро за последнее десятилетие, потому что этот слой осадков образован за 5–10 лет, согласно проведенной ранее оценке скорости осадконакопления.

Описание содержания элементов в поверхностном слое ДО начнем с приоритетных загрязняющих озеро тяжелых металлов — никеля и меди, по которым накоплен большой материал за последние 50 лет исследований химического состава ДО оз. Имандра (табл. 7.5). В таблице приведены содержания Ni и Cu в поверхностных слоях ДО оз. Имандра по результатам исследований различных лет, ссылки на которые приведены в примечании. Данные разбиты по плесам озера. Также показаны концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО Монче-губы и Белой губы плеса Большая Имандра, т. е. акваторий, в которые поступают стоки основных загрязняющих озеро промышленных предприятий — комбината «Североникель» и АО «Апатит» соответственно.

Поступление Ni и Cu, как и других ТМ, в оз. Имандра тоже связано в основном с деятельностью металлургического комбината «Североникель» и других горнодобывающих и обогатительных предприятий. При производстве этих двух металлов на комбинате «Североникель» используются одни и те же Cu-Ni руды — либо местные (месторождения Мончегорского и Печенгского районов Мурманской обл.), либо, начиная с 1960-х гг., привозные (из Норильского региона), с 1973 г. в производство в основном поступает высокосернистая (содержит до 30 % серы) руда Норильского ГОКа. Отличие этих двух приоритетных для региона загрязняющих ТМ состоит в путях их поступления в водоем. Согласно оценке баланса поступления и выноса ТМ в оз. Имандра (Моисеенко, 1992; Накопление..., 2000), объем Ni, поступающего в составе сточных вод в 8 раз превышает объем такового, поступающего с территории водосбора (т. е. в виде аэротехногенных выпадений). Для Cu отмечена другая картина: с водосбора этого металла поступило в 7,5 раза больше, чем в составе сточных вод. Максимальный объем поступления Ni (как и максимальное его производство) в составе сточных вод комбината «Североникель» был отмечен в начале 1980-х гг. — более 400 т/год (Антропогенные модификации..., 2002). Сброс Ni со сточными водами комбината «Североникель» в последнюю четверть XX века в связи падением производства, последовавшим в результате распада СССР, резко снизился со 150 т/год в 1991 г. до 0,3 т/год в последние годы⁵. Сброс Cu за это же время снизился с 7 до 0,1 т/год. Выбросы Ni и Cu в атмосферу комбинатом за этот период также резко сократились — с 2700 до 300 т/год и с 1800 до 600 т/год соответственно.

Содержание Ni в поверхностных слоях ДО в загрязняемой в конце 1960-х Монче-губе Большой Имандры не превышало 3000 мкг/г (0,3 %) (табл. 7.5, Комплексное изучение..., 1971), и в среднем в этом плесе озера оно составляло 300 мкг/г, т. е. в 6 раз больше среднего фонового. Как сказано выше, в это время пробы ДО отбирали дночерпателем и обрабатывали методом полуколичественного спектрального анализа, поэтому определяемые содержания, вероятно, были занижены, так как для анализа отбирался слой ДО минимум 10 см, а к моменту отбора проб слой загрязненных отложений такой мощности не мог сформироваться.

⁵ АО «Кольская ГМК»: [офиц. сайт]. Мончегорск. URL: <http://kolagmk.ru/> (дата обращения: 15.03.2022).

Таблица 7.5

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержание никеля и меди (мкг/г)
в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Никель			Медь		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	30	3000	300	30	3000	300
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	77	15940	3431	42	2900	778
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	506	30210	7015	221	5962	1575
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	2092	7060	3856	75	661	277
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	80	12400	5200	13	2100	550
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	3942	15940	9270	1386	2900	1965
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	14544	30210	22437	4221	5962	4961
Белая губа ^{4*}	1981–1984	108	187	148	40	49	45
Белая губа ^{5*}	1983–1985	20	700	100	30	50	44
Белая губа ^{2*}	1993–1998	560	1093	787	294	380	332
Белая губа ^{3*}	2007–2012	506	1590	989	221	391	299
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	13	2000	160	15	150	68
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	10	300	180	10	31	22
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	54	1212	687	12	318	189
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	135	1420	766	75	296	203
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	90	115	100	20	24	20
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	88	231	152	52	116	84
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	130	300	212	77	150	118

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980.

По направлению к южной части плеса концентрация Ni снижалась до 200–300 мкг/г, с минимальным значением 30 мкг/г (табл. 7.5). В Йокостровской и Бабинской Имандре в начале 1970-х гг. его содержание находилось в диапазоне от 13 до 2000 мкг/г, в среднем составляя 160 мкг/г (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). Таким образом, вниз по стоковому течению из озера концентрации этого металла снижались в среднем в 2 раза.

В начале 1980-х гг., т. е. в годы максимального поступления в озеро Ni в составе сточных вод комбината «Североникель», его концентрации в ДО Монче-губы резко возросли до среднего значения 5200 мкг/г (0,5 %), что более чем в 100 раз превышает среднее фоновое, и находились в диапазоне от 80 до 12 400 мкг/г (табл. 7.5, Крючков, Моисеенко, 1987), то есть в наиболее загрязненных акваториях содержание Ni в ДО было сопоставимо с его содержанием в кондиционной руде. В донных отложениях Белой губы наблюдалось значительное уменьшение концентраций Ni до среднего значения 100 мкг/г (в 2 раза превышает фоновое содержание), диапазон — 20–700 мкг/г (табл. 7.5, Крючков, Моисеенко, 1987). В Йокостровской и Бабинской Имандре средние содержания Ni в эти годы также значительно ниже, чем в Монче-губе, — 180 и 150 мкг/г соответственно (диапазон значений 10–300 и 88–230 мкг/г, Крючков, Моисеенко, 1987; Моисеенко, Яковлев, 1990).

Несмотря на значительное снижение поступления Ni в окружающую среду, в том числе и в оз. Имандра, в составе сточных вод и атмосферных выбросов комбината «Североникель» в 1990-е гг. было зафиксировано дальнейшее увеличение содержания Ni в поверхностном 1-см слое ДО (именно с этого времени начался отбор колонок ДО с выделением поверхностного сантиметрового слоя). Так, в Монче-губе среднее содержание этого металла практически достигло 1 %, а диапазон значений варьировался от 0,4 до 1,6 % (табл. 7.5). Высокие концентрации Ni (более 2000 мкг/г) были отмечены в северной части Большой Имандры (губы Куреньга и Пече), куда загрязнение из Монче-губы могло поступать с ветровыми и компенсационными течениями, а также со стоками АО «Олкон». В средней части Большой Имандры содержание металла снижается до 80 мкг/г, что, вероятно, связано с тем, что эта часть озера довольно узкая, здесь повышаются скорости стоковых течений, особенно вблизи островов, создаются неблагоприятные условия для седиментации тонкодисперсных взвешенных частиц, обладающих наибольшей сорбционной способностью. Эта часть озера является транзитной зоной для миграции загрязняющих веществ, в том числе и ТМ, вниз по стоковому течению. Повышение содержаний до средних значений 800 мкг/г (диапазон 560–1100 мкг/г) в 1990-х гг., по сравнению с 1980-ми, зафиксировано в Белой губе, как и Большой Имандре в целом: среднее — 3400 мкг/г, диапазон — 80–16 000 мкг/г. В Йокостровской Имандре также отмечено значительное увеличение содержания Ni до среднего значения около 700 мкг/г (диапазон — 54–1200 мкг/г). В Большой Имандре перед Йокостровским проливом замедляется течение воды, и при более спокойной гидродинамической обстановке происходит осаждение взвешенного материала, содержащего большое количество загрязняющих веществ, в том числе и тяжелыми металлами. Разбавление загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры, относительно более чистыми притоками, втекающими в Йокостровскую, приводит к некоторому снижению здесь содержания Ni в поверхностных ДО вниз по стоковому течению. В Бабинской Имандре концентрации увеличились по сравнению с 1980-ми гг. в среднем в 1,5 раза — до среднего значения 150 мкг/г (диапазон — 90–230 мкг/г).

В последнее десятилетие содержания Ni в поверхностном слое ДО озера продолжают расти (табл. 7.5, рис. 7.9). В Монче-губе они в среднем достигли более 2 %, что в 400 раз больше фоновое содержания. По сути, здесь ДО превратились в техногенную залежь, которую можно пускать в промышленный передел (диапазон содержания Ni — 1,5–3,0 %, выше, чем в кондиционной руде).

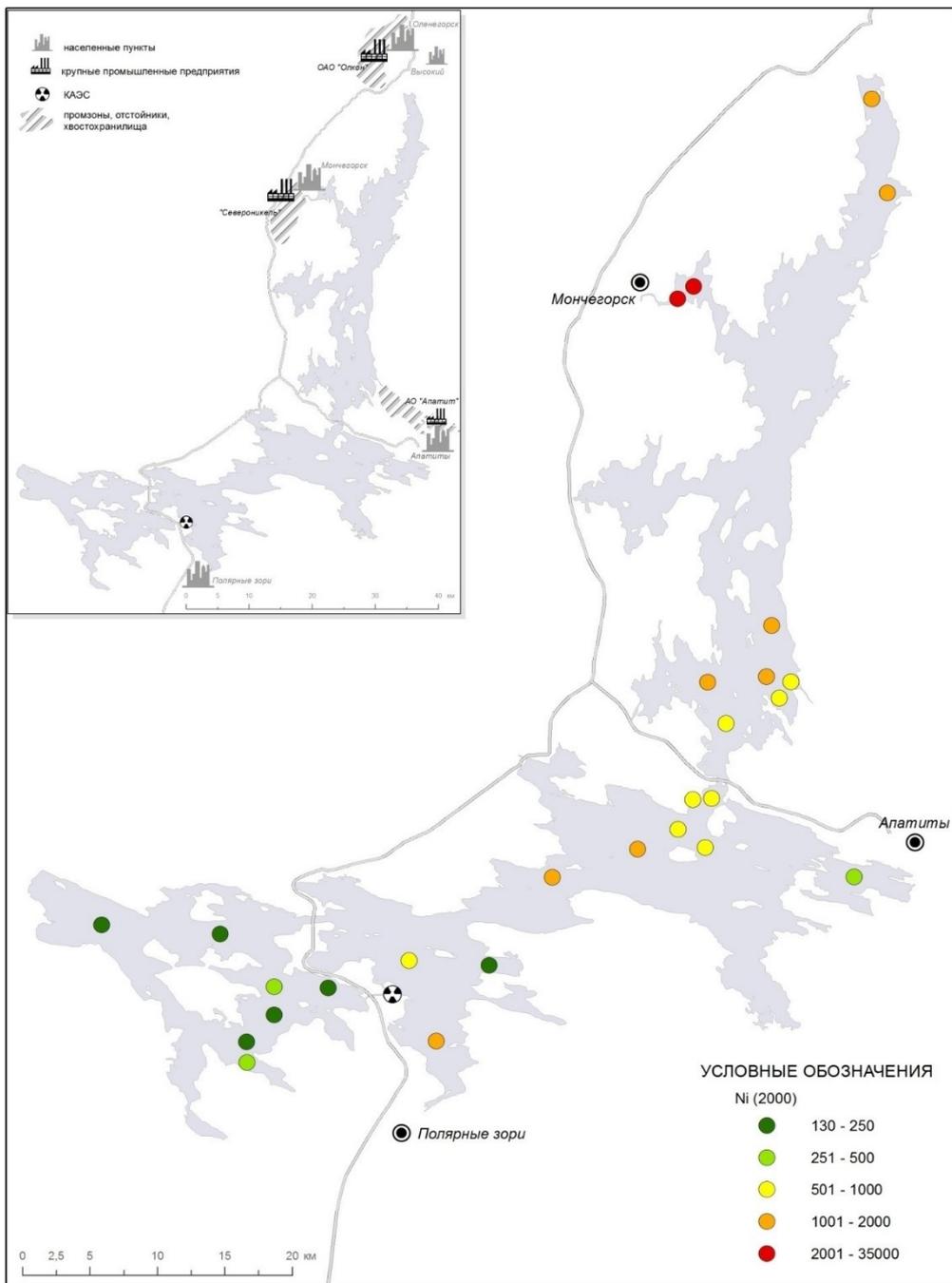


Рис. 7.9. Распределение содержания Ni (мкг/г) в ДО оз. Имандра по данным 2007–2012 гг.

Подобная картина большого увеличения содержания тяжелых металлов в ДО по сравнению с фоновыми значениями отмечена в оз. Кор Д'Ален, США (Horowitz et al., 1993; Effect..., 1995), загрязняемом промышленными стоками свинцово-цинковых рудников, здесь концентрации Pb достигают 2,75 % (в 833 раза выше фоновых значений), Zn — 1,4 % (в 118 раз), Cu — 0,07 % (в 22 раза).

В воде концентрации Ni в Монче-губе в настоящее время также самые высокие в озере — выше 15 мкг/л, что говорит о продолжающемся загрязнении озера комбинатом «Североникель». В северной части Большой Имандры отмечено некоторое снижение содержания Ni в ДО до 1500 мкг/г, что, вероятно, связано с уменьшением загрязнения со стороны АО «Олкон». В средней части Большой Имандры донные отложения не отбирались, потому что по результатам исследований 1990-х гг. было обнаружено, что эта часть озера является транзитной зоной. В Белой губе и прилегающей к ней акватории отмечено увеличение концентраций Ni по сравнению с 1990-ми гг. до среднего значения 1000 мкг/г (диапазон 500–1600 мкг/г), что говорит об увеличении поступления этого элемента в составе сточных вод, в том числе и коммунально-бытовых из городов Апатиты и Кировск. Среднее содержание Ni в Йокостровской Имандре в 2000 гг. по сравнению 1990-ми гг. немного повысилось до 776 мкг/г (диапазон значений 135–1420 мкг/г). Колонки ДО отбирали не только в открытой части плеса, как в 1990-х гг. но и в мелководных, довольно закрытых от поступления загрязненных тяжелыми металлами стоковых течений, Тик-губе и губе Княжая. В Бабинской Имандре также зафиксировано увеличение содержания Ni — до среднего 212 мкг/г (диапазон 130–300 мкг/г). Увеличение среднего содержания Ni в поверхностных ДО всех плесов Имандры в течение последних лет отражает общую тенденцию кумулятивного накопления загрязняющих веществ на территории водосбора и в самом озере за период деятельности промышленных предприятий на берегах озера, а также направленность на усиление антропогенной нагрузки на его экосистему. Данный эффект был отмечен и в ДО водоемов северо-западной части Мурманской обл. и приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией (Даувальтер и др., 2012, 2015).

Поступление Cu в оз. Имандра, как уже было сказано, обусловлено в основном деятельностью металлургического комбината «Североникель», побочные последствия которой — атмосферные выбросы и сброс сточных вод в Монче-губу. В конце 1960-х гг. максимальные содержания Cu (более 0,22 %, или 2200 мкг/г) были отмечены в губах Куреньга, Пече и Коим, то есть не в месте поступления сточных вод комбината «Североникель» (Комплексное изучение Йокостровской..., 1971). Кроме того, это связано, вероятно, и с поступлением сточных вод Оленегорского ГОКа, и с компенсационными и нагоновыми течениями, перемещающими загрязненные воды из Монче-губы в северную оконечность Большой Имандры. В Монче-губе в это время концентрации Cu находились в пределах от 300 до 800 мкг/г, а в Белой губе они снижались до значений менее 300 мкг/г. В целом в Большой Имандре содержания Cu в поверхностных слоях ДО находились в диапазоне от 30 до 3000 мкг/г, в среднем составляя 300 мкг/г, то есть примерно на порядок превышая фоновое значение. В 1970-е гг. среднее содержание Cu в Йокостровской и Бабинской Имандре составляло 70 мкг/г (около 2 фоновых значений), а диапазон содержаний 15–150 мкг/г (см. табл. 7.5, Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). Можно сказать, что уже в эти годы было зафиксировано довольно сильное влияние горно-металлургических комбинатов на содержание Cu, особенно в северной части Большой Имандры.

В 1980-е гг. содержание Си в Монче-губе находилось в пределах от 13 до 2100 мкг/г (в среднем составляя 550 мкг/г, Крючков, Моисеенко, 1987), то есть максимальные содержания значительно увеличились по сравнению с 1960-ми. В Белой губе в 1980-е гг. содержания Си соответствовали фоновым значениям, а в Йокостровской и Бабинской Имандре они в среднем были в 2 раза ниже фоновых (Крючков, Моисеенко, 1987), резкое их увеличение было отмечено в 1990-е гг. Так, в Монче-губе в это время среднее содержание Си выросло до 2000 мкг/г (диапазон 1400–2900 мкг/г, см. табл. 7.5), что почти в 50 раз больше фонового показателя (Антропогенные модификации..., 2002). В северной части Большой Имандры, наоборот, отмечено уменьшение концентраций до 240–580 мкг/г по сравнению с содержаниями этого металла в 1960-х гг. В Белой губе и прилегающей к ней акватории также зафиксировано значительное, как и в Монче-губе, увеличение (практически на порядок) содержания Си до среднего значения 330 мкг/г (диапазон 290–380 мкг/г).

В Большой Имандре в целом содержание металла, по сравнению с 1960-ми гг., увеличилось более чем в 2 раза: среднее значение — 780 мкг/г, диапазон — 42–2900 мкг/г, что говорит об увеличении его поступления в первую очередь в составе сточных вод и атмосферных выбросов комбината «Североникель», особенно в 1980-е гг., когда производство и сбросы Си достигли максимальных значений (Антропогенные модификации..., 2002). В Йокостровской и Бабинской Имандре также наблюдался довольно значительное повышение концентраций Си до средних значений 190 и 84 мкг/г соответственно, что на порядок и в 4 раза больше, чем в 1980-е гг.

Содержания Си в поверхностном 1-см слое ДО Большой Имандры продолжили увеличиваться и в 2000-е гг., в настоящее время они находятся в диапазоне от 220 до 6000 мкг/г, в среднем составляя 1600 мкг/г (см. табл. 7.5, рис. 7.10). В Монче-губе содержание Си максимально — 4200–6000 мкг/г, в среднем 0,5 %, что более чем в 100 раз превысило фоновые значения. В северной части Большой Имандры концентрации Си находились в диапазоне от 260 до 310 мкг/г (рис. 7.10); в Белой губе, по сравнению с 1990-ми гг., они немного снизились до средней величины 300 мкг/г (диапазон 220–390 мкг/г).

Содержание Си в поверхностных ДО Большой Имандры выше, чем в ДО Йокостровской Имандры. Это связано с влиянием основного источника поступления тяжелых металлов в оз. Имандра — комбината «Североникель», хотя исключать поступление меди со стоками АО «Апатит» полностью нельзя. Перед Йокостровским проливом, в Большой Имандре, замедляется течение воды, и при более спокойной гидродинамической обстановке происходит осаждение взвешенного материала, принесенного со стоками комбината «Североникель». В Йокостровской Имандре содержание Си в 1,5 раза меньше (среднее значение 200 мкг/г), чем в Белой губе и прилегающей акватории (табл. 7.5), что связано с разбавлением загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры, относительно более чистыми притоками, втекающими в Йокостровскую Имандру, например, реки Чуна. Концентрации Си в Йокостровской Имандре, по сравнению с 1990-ми гг., продолжили свой рост, в Бабинской Имандре они увеличились до среднего значения 120 мкг/г (диапазон 80–150 мкг/г), что почти в 3 раза больше фоновых значений.

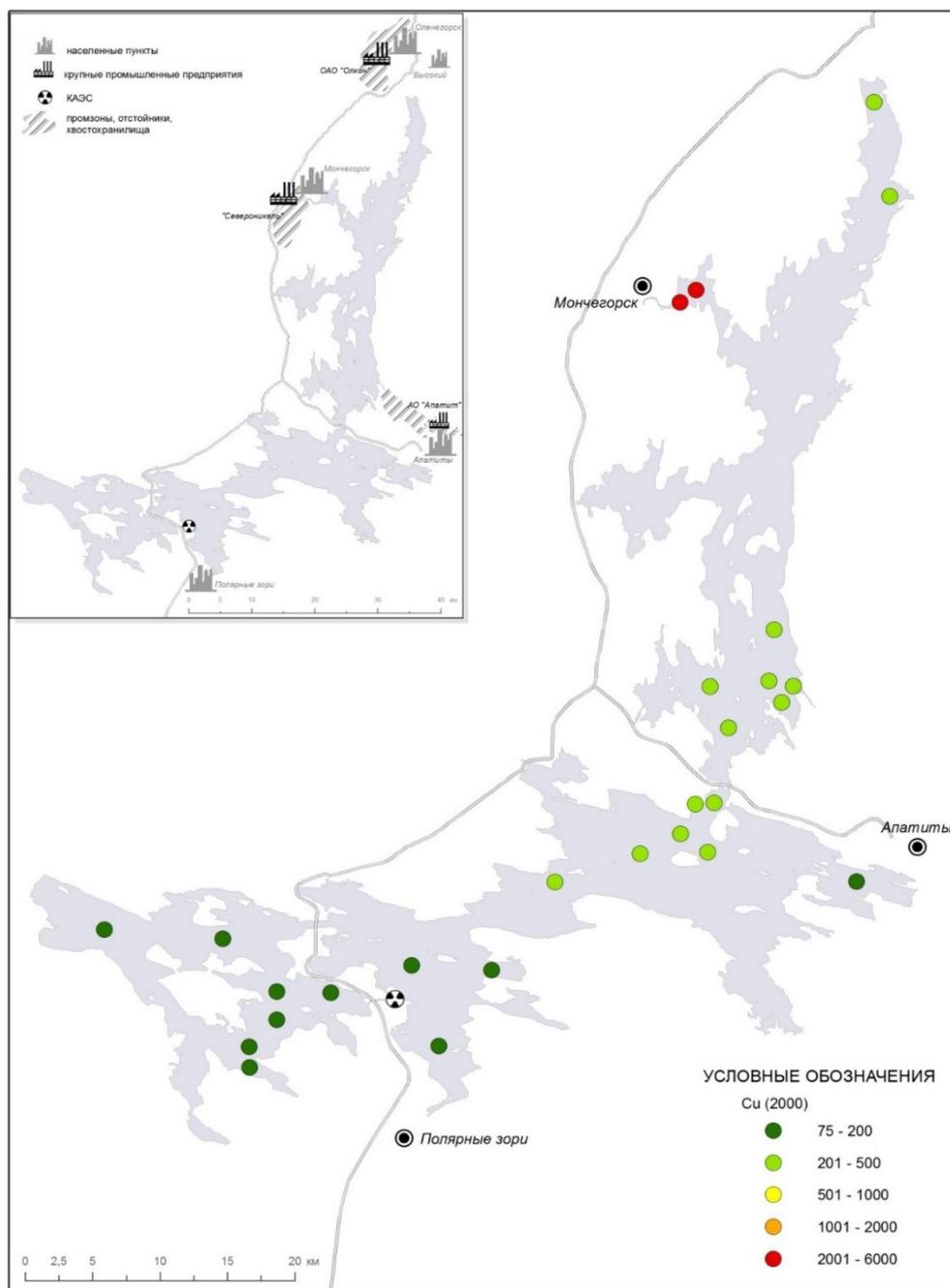


Рис. 7.10. Распределение содержания Cu (мкг/л) в ДО оз. Имандра по данным 2007–2012 гг.

Поступление цинка и кобальта в оз. Имандра, как и меди и никеля и других тяжелых металлов, связано в первую очередь с металлургическим комбинатом «Североникель», потому что в составе перерабатываемой им медно-никелевой руды есть такие минералы, как сфалерит ZnS , кобальтин $CoAsS$ и другие, содержащие Zn и Co (Mineralogy..., 1999), этому также способствует и производство другой продукции на водосборе оз. Имандра.

В территориальном распределении содержания Zn в поверхностном слое ДО оз. Имандра наблюдается закономерность, отмеченная ранее для Cu и Ni, — более высокие концентрации в Большой Имандре, чем в Йокостровской и Бабинской (табл. 7.6). Картина его территориального распределения в ДО исследуемых акваторий оз. Имандра отличается от распределения вышеописанных Cu и Ni меньшей контрастностью и меньшим разбросом содержаний.

Первые сведения о содержаниях Zn в поверхностных ДО оз. Имандра были получены в результате исследований Йокостровской и Бабинской Имандры в 1971–1975 гг. (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980), в которых выявлено, что максимальные концентрации доходили до 2000 мкг/г (табл. 7.6). Содержание элементов в ДО, как уже было отмечено ранее, тогда определялось полуколичественным спектральным анализом, и вполне вероятно, что эти значения завышены. В пользу этого утверждения свидетельствуют более низкие содержания Zn (немногим более средних фоновых значений) в ДО Мончегубы, куда поступают стоки комбината «Североникель», в первой половине 1980-х гг. (табл. 7.6). Низкое содержание Zn в поверхностных ДО в это время было зафиксировано также и в Белой губе. Концентрации Zn в ДО всех плесов оз. Имандра возросли в 1990-е гг., и в Большой и Йокостровской Имандре они сравнялись, достигнув в среднем 130 мкг/г, а в Бабинской — 100 мкг/г (табл. 7.6). В Белой и Мончегубе концентрации Zn в это время незначительно больше, чем в целом по Большой Имандре, хотя отчетливо видно, что источником поступления элемента в озеро являются стоки комбината «Североникель» (табл. 7.6). Максимальное содержание Zn (350 мкг/г) зафиксировано в средней части Йокостровской Имандры.

В 2000-е гг. выявлено дальнейшее повышение содержания Zn в ДО Большой Имандры, что отражает общую тенденцию кумулятивного накопления загрязняющих веществ в озеро, отмеченную ранее для Ni и Cu. Средние содержания Zn в Белой и Мончегубе увеличились более чем в 2 раза (табл. 7.6). Максимальное содержание Zn зафиксировано в Белой губе на станции I-21 (1200 мкг/г). В ДО оз. Б. Вудъявр, как и на станции I-21, отмечается резкое увеличение концентраций Zn, что, возможно, связано с использованием реагентов обогащения апатитонепелиновой руды с повышенным содержанием этого ТМ (Оценка..., 2013). В Йокостровской Имандре концентрации Zn в поверхностном слое ДО в среднем немного более средней фоновой концентрации, а в Бабинской Имандре соответствует этому значению.

Данные о содержании кобальта в ДО оз. Имандра, как и для Zn, впервые были получены в результате съемки на Йокостровской и Бабинской Имандре в начале 1970-х гг. (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976). Среднее содержание было рассчитано в 60 мкг/г (табл. 7.6). Вероятно, что они немного завышены, так как определялись спектральным полуколичественным методом.

Наиболее загрязненной Co акваторией в начале 1980-х гг. являлась Мончегуба [среднее содержание — 134 мкг/г (Моисеенко, Яковлев, 1990)], что объясняется поступлением сточных вод комбината «Североникель», в состав которых входил данный элемент в повышенных концентрациях. В Белой губе в это время его среднее содержание было немного меньше — 100 мкг/г, в Бабинской Имандре — около 40 мкг/г (табл. 7.6). Таким образом, подтвердилась основная роль деятельности комбината «Североникель» в загрязнении озера этим токсичным в повышенных концентрациях тяжелым металлом.

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержание цинка и кобальта (мкг/г) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Цинк			Кобальт		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	–	–	–	–	–	–
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	53	258	131	9	313	82
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	92	1217	272	26	546	139
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	114	160	130	92	199	134
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	25	213	109	–	–	–
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	117	258	164	151	313	223
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	312	335	320	316	546	431
Белая губа ^{4*}	1981–1984	100	107	104	10	187	99
Белая губа ^{5*}	1983–1985	94	130	108	–	–	–
Белая губа ^{2*}	1993–1998	147	162	152	15	33	24
Белая губа ^{3*}	2007–2012	100	1217	339	26	32	29
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	10	2000	300	3	120	60
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	30	352	129	9	94	27
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	53	210	101	12	62	27
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	54	112	88	36	44	39
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	79	113	97	7	28	19
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	90	130	108	19	24	21

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980.

В 1990-е гг. в лаборатории ИППЭС КНЦ РАН был взят на вооружение метод атомно-абсорбционной спектрофотометрии, поэтому начиная с этого времени концентрации Co в ДО озера определялись с высокой точностью. Наибольшее содержание Co (свыше 300 мкг/г, что в более чем в 20 раз превышает средние фоновые значения) выявлено в Монче-губе (табл. 7.6). Далее по потоку наблюдается снижение концентрации, и в районе Белой губы она достигает 15 мкг/г, что сопоставимо с фоновой. В Йокостровской и Бабинской Имандре содержания Co в целом также сопоставимы с фоновым, хотя в центральной части Йокостровской Имандры зафиксирован довольно высокий показатель — 94 мкг/г.

По результатам исследований в последнее десятилетие зафиксирован дальнейший рост содержаний Co в поверхностном слое донных отложений оз. Имандра (табл. 7.6). В поверхностном слое ДО Монче-губы они достигают 550 мкг/г, что почти в 30 раз больше среднего фонового показателя. Далее по распространению потока стоковых течений происходит значительное снижение содержания Co , и в Белой губе оно в среднем составляет 29 мкг/г, что в 1,5 раза превышает фоновое. В Йокостровской и Бабинской Имандре содержание Co постепенно приближается к фоновому (27 и 21 мкг/г соответственно). Таким образом, установлено, что концентрации данного элемента выше в Большой Имандре, чем в Йокостровской (табл. 7.6), что продолжает выявленную для ранее описанных тяжелых металлов тенденцию. Влияние выбросов и стоков комбината «Североникель» сказалось на концентрациях и этого металла. В целом содержания Co в поверхностном слое ДО исследуемых станций изменяются в пределах от 12 до 546 мкг/г.

Далее описываются токсичные халькофильные металлы, опасность которых для гидробионтов в повышенных концентрациях чрезвычайно велика (Даувальтер, Кашулин, 2015а).

Содержание кадмия в ДО оз. Имандра исследовалось последние 25 лет, и методика его определения в 1990-х и 2000-х гг. отличается: в 1990-е гг. определяли методом атомной абсорбции в пламени, в 2000-е гг. — в печи. Поэтому точность определения Cd в 2000-е гг. выше, что видно по определенным показателям в фоновых слоях ДО: в 1990-е гг. среднее содержание равнялось 1,45 мкг/г, в 2000-е гг. — 0,17 мкг/г, то есть практически на 2 порядка. Однако не учитывать результаты исследований 1990-х гг. было бы неправильно.

В 1990-е гг. было установлено, что комбинат «Североникель» является источником поступления Cd в воду озера, что проявилось в высоких концентрациях, достигающих 7 мкг/г, этого элемента в ДО Монче-губы (табл. 7.7). Далее по направлению потока на выходе из губы содержание данного металла снизилось до 4,1 мкг/г, и в остальной части Большой, а также Йокостровской и Бабинской Имандры зафиксированы значения, сопоставимые с определенным для этого периода средними фоновыми. Только в южной акватории Большой Имандры и в центральной части Йокостровской Имандры отмечалось содержание Cd , равное 4 мкг/г.

Концентрации Cd в поверхностном слое ДО Монче-губы, определенные по результатам исследований 2000-х гг., достигают 9 мкг/г, что более чем в 50 раз превышает среднее фоновое значение (табл. 7.7). По всей остальной акватории озера зафиксированы содержания Cd , не превышающие 1 мкг/г, за исключением Зашеечной губы (1,5 мкг/г). В поверхностном слое донных отложений среднее содержание Cd в Большой Имандре выше такового в Йокостровской Имандре (см. табл. 7.7).

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания кадмия и свинца (мкг/г) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Cd			Pb		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	–	–	–	–	–	–
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	1,00	7,00	2,82	15	76	36
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	0,36	9,24	2,40	9	88	32
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	12	72	38
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	20	60	34
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	4,07	7,00	5,13	24	76	60
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	6,12	9,24	7,20	81	88	84
Белая губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	7	12	10
Белая губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	5	5	5
Белая губа ^{2*}	1993–1998	1,00	4,00	2,33	29	30	30
Белая губа ^{3*}	2007–2012	0,36	0,73	0,53	9	15	12
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	–	–	–	1	60	20
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	5	15	9
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	1,00	4,01	2,25	10	56	30
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,19	1,47	0,60	11	25	17
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	–	–	–	8	12	10
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	1,00	3,00	1,96	35	50	39
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,37	0,76	0,55	20	29	25

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980.

На исследуемых станциях содержание Cd находится в диапазоне от 0,19 до 9,24 мкг/г. В Большой Имандре происходит уменьшение содержания Cd по направлению распространения потока загрязнения от главного источника загрязнения тяжелых металлов оз. Имандра — комбината «Североникель». Минимальные содержания Cd отмечаются на станциях Йокостровского пролива и Белой губы — там высокие скорости течения не позволяют откладываться тонкодисперсному материалу с высоким содержанием сорбированных ТМ, а также в губах Тик, Княжая, лежащих за пределами потока распространения загрязняющих веществ.

Первые сведения о содержании свинца в ДО Йокостровской и Бабинской Имандры были получены в начале 1970-х гг. (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980), тогда было определено, что среднее содержание этого халькофильного элемента составляет 20 мкг/г (см. табл. 7.7).

В результате съемки озера в начале 1980-х гг. было зафиксировано, что максимальные концентрации Pb (до 72 мкг/г) содержатся в ДО Монче-губы, тем самым подтвердился факт, что источником поступления этого металла является комбинат «Североникель». Его одержания на остальной части озера (Белая губа, Йокостровская и Бабинская Имандра) в это время значительно меньше и в среднем не превышают 10 мкг/г (см. табл. 7.7).

Максимальные содержания Pb в 1990-е гг. (до 76 мкг/г, среднее — 60 мкг/г) были отмечены также в Монче-губе (табл. 7.7). По отдельным плесам озера они сопоставимы и находятся в пределах от 30 до 39 мкг/г, причем наибольшее среднее значение зафиксировано в Бабинской Имандре, а в Йокостровской максимальное (56 мкг/г) отмечено в Зашеечной губе, куда поступает все стоковое течение из озера и создаются условия для аккумуляции основных загрязняющих веществ. Это повышение содержания Pb на довольно значительном удалении от основных промышленных предприятий, расположенных на берегах озера, говорит о том, что в загрязнении озера Pb могут участвовать и другие источники, помимо основных — предприятий «Апатит» и «Североникель» — на акваториях Большой и Йокостровской Имандры. Это может быть связано с использованием этилированного бензина как топлива для автомобилей и моторных лодок: в озеро, вероятно, попадают как продукты сгорания этилированного бензина, так и сам бензин, особенно при эксплуатации многочисленных моторных лодок.

В распределении Pb в поверхностном слое ДО исследуемых станций в 2000-е гг. намечается картина, подобная установленной в 1990-е гг. Максимальные содержания Pb (до 88 мкг/г, что более чем в 15 раз превышает фоновое) зафиксированы в Монче-губе (см. табл. 7.7). На остальной части акватории Большой Имандры концентрации свинца не превышают 15 мкг/г, зато в Йокостровской и Бабинской Имандре они увеличиваются до 25 и 29 мкг/г соответственно. Средние содержания Pb в ДО Бабинской Имандры больше, чем в Йокостровской, и были бы больше, чем в Большой Имандре, без учета данных по Монче-губе (всего лишь 15 мкг/г).

Таким образом, подтвердилось предположение, что, помимо стоков комбината «Североникель», существуют другие источники поступления этого токсичного халькофильного металла в оз. Имандра. Вероятно, это использование этилированного бензина, сжигание угля, нефти и другого топлива, в состав которого в повышенных содержаниях входит свинец (Thehistory..., 1990).

Концентрации мышьяка и ртути в ДО оз. Имандра массово начали определять только с 2000-х гг., поэтому доступные результаты по этим чрезвычайно токсичным халькофильным элементам имеются только за последнее десятилетие (табл. 7.8). В распределении As в поверхностном слое ДО исследуемых станций оз. Имандра отмечается картина, характерная для большинства исследуемых тяжелых металлов: максимальные содержания (до 124 мкг/г, что более чем в 20 раз больше фоновых значений) зафиксированы в ДО Монче-губы (табл. 7.8). Далее по мере распределения потока в Большой и Йокостровской Имандре содержание As находится в диапазоне 10–25 мкг/г, что превышает среднюю величину в фоновых слоях ДО озер Мурманской обл. в 2–5 раз. Минимальные концентрации мышьяка отмечаются вблизи Йокостровского пролива, где высокие скорости течения не позволяют откладываться тонкодисперсному материалу с высоким содержанием сорбированных загрязняющих веществ. В Бабинской Имандре его концентрации находятся в пределах 6–10 мкг/г, что немногим больше фоновых значений. Таким образом, установлено, что и для мышьяка основным источником поступления в оз. Имандра являются сточные воды комбината «Североникель».

Таблица 7.8

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания As и Hg (мкг/г) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра в 2000-е гг.

Плес озера	Период, годы	As			Hg		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра	2007–2012	9,7	124	28,8	0,079	1,000	0,335
Монче-губа	2007–2012	54,0	124	88,9	0,590	1,000	0,795
Белая губа	2007–2012	9,7	19,0	14,1	0,166	0,380	0,267
Йокостровская Имандра	2007–2012	5,7	25,4	14,8	0,018	0,305	0,154
Бабинская Имандра	2007–2012	6,0	10,0	7,8	0,058	0,126	0,097

Примечание. Исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет.

Концентрации ртути в поверхностном слое ДО выше в плесе Большая Имандра, чем в Йокостровской, а в Йокостровской Имандре выше, чем в Бабинской (рис. 7.11, табл. 7.8). На исследуемых станциях содержание Hg находится в широком диапазоне — от 0,018 до 1,00 мкг/г. В Большой Имандре оно снижается по направлению распространения потока загрязнения от главного источника загрязнения — комбината «Североникель», где отмечается максимальные концентрации, более чем в 20 раз превышающие фоновое значение. В южной акватории Большой Имандры, в месте поступления стоков АО «Апатит», средние содержания Hg снижаются до 0,27 мкг/г, что все равно более чем в 5 раз больше фонового. В процессе апатитонелефинового производства, как отмечалось ранее, при проведении взрывов использовалась гремучая ртуть, что привело к загрязнению озера этим металлом.

Высокие содержания Hg в ДО южной части Большой Имандры говорят в пользу того, что именно сточные воды АО «Апатит» являются причиной загрязнения ДО озера этим металлом. Его минимальные содержания на станциях

Йокостровской Имандры отмечаются в губах, которые, как правило, лежат за пределами потока распространения загрязняющих веществ (например, Княжая и Тик-губа). Наименьшее содержание Hg (в диапазоне от 0,02 до 0,13 мкг/г) зафиксировано в поверхностном слое ДО Бабинской Имандры и западной части Йокостровской Имандры.

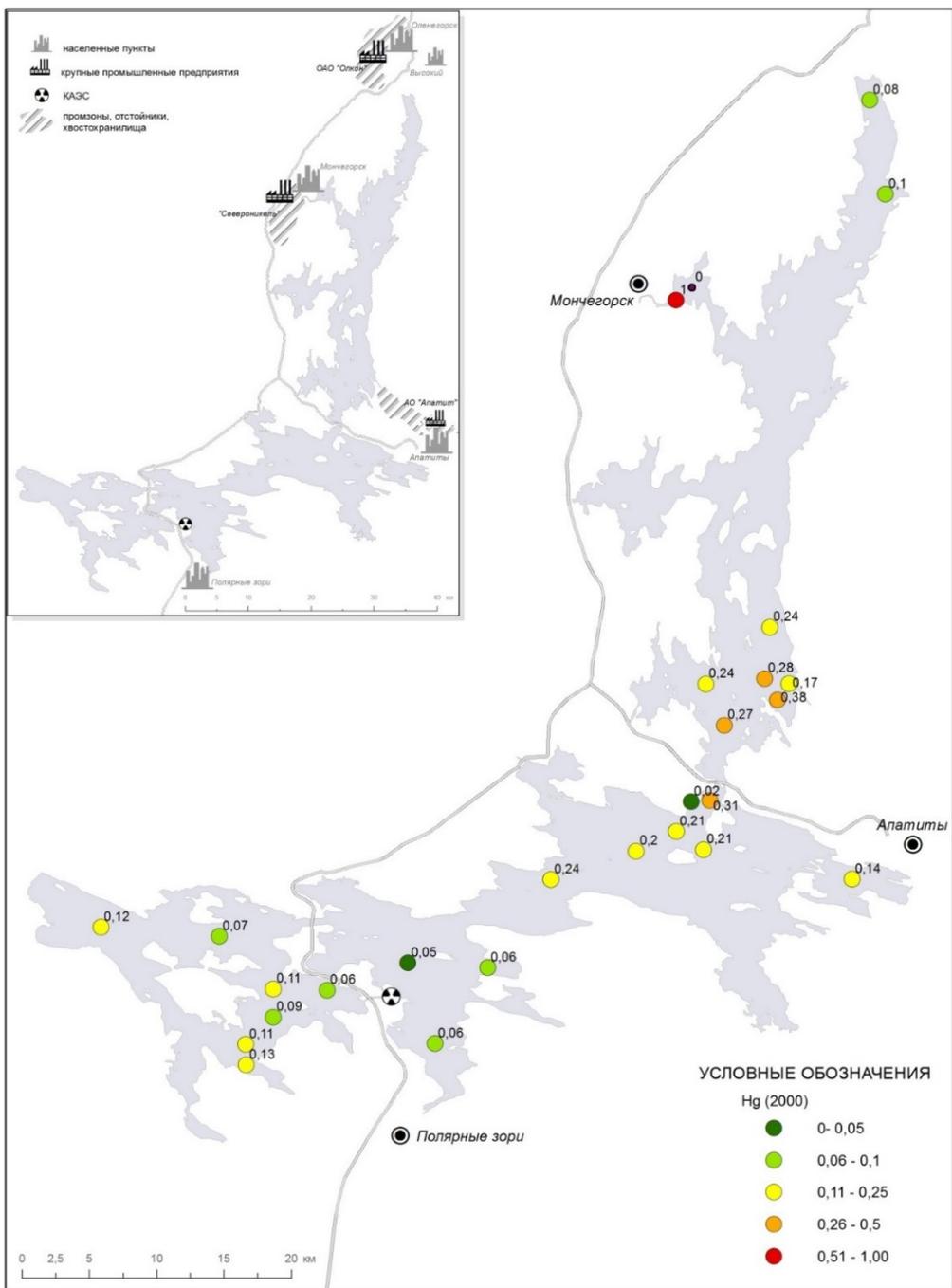


Рис. 7.11. Распределение содержания Hg (мкг/г) в ДО оз. Имандра по данным 2007–2012 гг.

В результате гидрохимической съемки 1966–1968 гг. были получены данные о распределении марганца в ДО Большой Имандры, согласно которым его среднее содержание — 0,3 % (табл. 7.9). Было зафиксировано, что распределение этого тяжелого металла в то время очень неравномерное: повышенные содержания (до > 10 %) отмечаются в месте впадения сточных вод Оленегорского ГОКа, что связано с добычей и переработкой железистых кварцитов на комбинате, а он там является сопутствующим элементом. Обнаружены также акватории с повышенным (до > 10 %) содержанием Mn в центральной и южной части Большой Имандры. Вероятно, там создаются условия для интенсивной аккумуляции оксидов и гидрооксидов Mn, в первую очередь обеспечивается хорошее снабжение придонных слоев воды кислородом. На остальной акватории Большой Имандры его содержание по преимуществу находилось в пределах от < 0,3 до 1,3 %.

В Йокостровской и Бабинской Имандре в начале 1970-х гг. концентрации Mn в ДО находились в диапазоне 0,02–10 % со средним значением 1,1 % (табл. 7.9). В начале 1980-х гг. содержание Mn в ДО губ Монче и Белой, а также Бабинской Имандры было значительно ниже, чем в Йокостровской и Бабинской Имандре в этот период, но в целом оно отличалось незначительно и в среднем находилось в диапазоне от 0,12 до 0,31 % (табл. 7.9).

Повышенное содержание Mn в 1990-х гг. четко фиксируется в ДО губы Куреньга (до 2,3 %, что более чем на порядок больше среднего фоновое), куда поступали стоки Оленегорского ГОКа, деятельность которого связана с добычей и переработкой железистых кварцитов. Повышенные концентрации металла отмечаются также в местах поступления речных притоков в губы Камка, Кунчаст, Уполокша (Бабинская Имандра) и мест, где встречаются воды Монче-губы с водами открытой части Большой губы. Объяснением этого может быть образование геохимического (вероятно, окислительного) барьера, где богатые марганцем кислые воды притоков поступают в богатые кислородом нейтральные воды оз. Имандра. При этом происходит окисление Mn до четырехвалентного и осаждение его в виде оксидов и гидрооксидов. Максимальное содержание установлено в центре Йокостровской Имандры (7,8 %), где, вероятно, создаются условия для формирования железомарганцевых образований. На остальной акватории озера его концентрации были сопоставимы с фоновыми и находились в пределах 0,05–0,4 %.

Территориальное распределение Mn в ДО оз. Имандра в 2000-х гг. свидетельствует о том, что стоки АО «Олкон» продолжают являться источником его поступления в воду и ДО озера. Концентрации Mn в поверхностном слое губы Куреньга варьируют в диапазоне от 2,75 до 2,95 %, что почти в 20 раз выше фоновой. Наибольшее содержание в поверхностном слое ДО зафиксировано в Зашеечной губе и к северу от нее, в западной части Йокостровской Имандры (3,78 %), повышенное (2,2 %) отмечено в губе Уполокша, что, вероятно, связано со смешением речных и озерных вод, о чем уже было сказано выше. Увеличение содержания марганца может быть обусловлено природными, а не техногенными, физико-химическими условиями, существующими в воде и ДО, в первую очередь с распределением величин окислительно-восстановительного потенциала. Как было уже показано, граница между восстановительными и окислительными условиями проходит в приповерхностных слоях ДО.

Таблица 7.9

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания марганца и железа (%) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Марганец			Железо		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	0,01	> 10,0	0,30	0,30	> 10,0	1,50
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	0,05	2,61	0,55	1,21	4,16	2,69
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	0,09	2,95	0,89	1,29	4,12	2,50
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	0,09	0,45	0,31	–	–	–
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	0,14	2,61	0,84	1,98	3,63	2,88
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	0,09	0,10	0,09	1,29	2,19	1,72
Белая губа ^{4*}	1981–1984	0,07	0,17	0,12	–	–	–
Белая губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Белая губа ^{2*}	1993–1998	0,05	0,49	0,22	1,90	2,80	2,25
Белая губа ^{3*}	2007–2012	0,19	1,15	0,56	2,34	2,56	2,45
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	0,02	10,00	1,13	2,35	10,00	8,14
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	0,16	7,84	1,56	1,14	7,97	3,14
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,06	3,78	1,17	1,87	15,05	4,73
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	0,05	0,28	0,16	–	–	–
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	0,17	2,75	1,06	2,22	11,54	5,11
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,01	2,17	0,76	3,22	4,78	3,73

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976; Чижиков, 1980.

По результатам гидрохимической съемки оз. Имандра 1966–1968 гг. было установлено, что повышенные содержания железа ($> 5 \%$) в ДО отмечаются в месте поступления стоков Оленегорского ГОКа, несущих воды с повышенным содержанием этого металла, а также на акватории смешения вод из губ Монче, Вите и Кислой с открытой частью Большой Имандры и в районе Йокостровского пролива. В целом по результатам анализа проб ДО с 78 станций Большой Имандры среднее содержание Fe в это время оценивалось равным $1,5 \%$ (см. табл. 7.9). В начале 1970-х гг. в ДО Йокостровской и Бабинской Имандры оно было значительно больше — $8,14 \%$ с диапазоном значений $2,35\text{--}10 \%$.

В 1990-е гг. повышенные концентрации Fe в ДО наблюдались в губе Куреньга ($4,2 \%$), куда поступают сточные воды железорудного производства, а также в местах смешения вод из Монче-губы с открытой частью Большой Имандры, поступления речных притоков в губы Камка, Кунчаст и Уполокша Бабинской Имандры. Вероятно, на этих акваториях происходит образование геохимического (вероятно, окислительного) барьера, где, как в случае с марганцем, богатые железом кислые воды притоков поступают в богатые кислородом нейтральные воды оз. Имандра и происходит его окисление до трехвалентного и осаждение его в виде оксидов и гидрооксидов. Максимальное содержание Fe в ДО было зафиксировано именно в губе Камка ($11,5 \%$, что в 3 раза превышает среднее фоновое значение). Высокие концентрации данного металла (8%) отмечаются и в ДО центральной части Йокостровской Имандры, именно здесь установлено наличие железомарганцевых образований (Даувальтер, Ильяшук, 2007), что и может объяснить данное явление.

В 2000-х гг. территориальное распределение содержания Fe, впрочем, как и Mn, в ДО оз. Имандра, свидетельствует о том, что стоки АО «Олкон» являются источником его поступления в воду и донные отложения озера. Концентрации металла в поверхностном слое ДО губы Куреньга равны $4,1 \%$, среднее содержание в Большой Имандре составляет $2,5 \%$ (см. табл. 7.9), а повышенные фиксируются в ДО губ Кунчаст и Уполокша Бабинской Имандры ($4,8$ и $3,6 \%$ соответственно), что, как отмечалось ранее, связано с поступлением кислых вод притоков, богатых железом. Среднее содержание Fe ($3,7 \%$) в ДО Бабинской Имандры выше, чем таковое в ДО Большой Имандры. Наибольшая концентрация данного элемента (15% , что почти в 5 раз выше среднего фонового значения) в поверхностном слое ДО зафиксирована в Зашеечной губе Йокостровской Имандры, в колонке ДО которой максимальное значение (32%) отмечено в слое $4\text{--}5$ см (см. рис. 7.6). Среднее содержание Fe — $4,7 \%$ в ДО Йокостровской Имандры наибольшее среди всех плесов озера, что выше, чем в поверхностном слое ДО губы Куреньга, куда поступают стоки железорудного производства. Повышенное содержание Fe в ДО Йокостровской Имандры, скорее всего, обусловлено природными физико-химическими, а не техногенными условиями, существующими в воде и ДО озера, о чем говорилось ранее.

Таким образом, на формирование содержания железа, как и марганца, в ДО оз. Имандра влияют как техногенные источники его поступления, прежде всего Оленегорский ГОК, так и природные физико-химические условия — в первую очередь кислотно-щелочные и восстановительно-окислительные условия.

Первые сведения о содержании стронция в ДО оз. Имандра были получены в результате гидрохимической съемки Йокостровской и Бабинской Имандры в первой половине 1970-х гг. (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976; Чижиков, 1980). Тогда было установлено, что среднее содержание данного элемента в этих двух плесах озера равно 500 мкг/г (табл. 7.10).

Таблица 7.10

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания стронция и хрома (мкг/г) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Стронций			Хром		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	–	–	–	–	–	–
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	3	2500	719	29	180	68
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	28	3900	1098	22	175	65
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	50	551	246
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	30	714	279	50	180	98
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	28	53	44	115	175	141
Белая губа ^{4*}	1981–1984	2053	6075	4064	15	50	33
Белая губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Белая губа ^{2*}	1993–1998	1250	2500	1693	43	43	43
Белая губа ^{3*}	2007–2012	1160	3900	1980	22	41	31
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	30	1000	500	1	150	100
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	3	1743	397	34	72	59
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	72	1747	609	27	62	43
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	188	321	250	66	91	78
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	14	143	80	50	87	66
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	40	78	66	73	88	82

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976; Чижиков, 1980.

В начале 1980-х гг. было определено содержание стронция в ДО губы Белой Большой Имандры, куда поступают стоки АО «Апатит». Данный показатель находится в пределах от 2000 до 6000 мкг/г, со средним значением в 4000 мкг/г (Моисеенко, Яковлев, 1990). Среднее содержание Sr в ДО Бабинской Имандры в это время составляло 250 мкг/г, то есть более чем на порядок меньше, чем в Белой губе.

Наибольшее содержание Sr (до 2500 мкг/г) в ДО в 1990-е гг. отмечалось в южной части Большой Имандры, что связано с поступлением сточных вод АО «Апатит», щедро «обогащенных» этим элементом. В пользу этого говорят самые высокие концентрации Sr (> 80 мкг/л) в воде Белой губы и прилегающей акватории. Среднее содержание Sr в ДО Белой губы составляло 1700 мкг/г, в Монче-губе значительно оно меньше — 280 мкг/г (табл. 7.10). Распределение средних содержаний по отдельным плесам оз. Имандра хорошо согласуется с распределением этого элемента по мере разбавления потока от основного источника поступления в Белую губу к более удаленным акваториям. Наибольшее среднее содержание Sr зафиксировано в ДО Большой Имандры — 720 мкг/г, далее в Йокостровской Имандре оно доходит до 400 мкг/г, а в Бабинской снижается до 80 мкг/г, что становится сопоставимым со средним фоновым содержанием этого элемента. Интересно, что в губах Камка и Уполокша отмечается некоторое увеличение содержания в ДО — до 140 и 110 мкг/г соответственно.

Наглядно подтверждает предположение, что именно стоки добычи и обогащения апатитоневелинового производства (АО «Апатит») являются главными источниками поступления металла в оз. Имандра, выполненное территориальное распределение значений Sr в поверхностном слое (0–1 см) донных отложений оз. Имандра в 2000-х гг. (см. табл. 7.10). Наибольшее содержание Sr (около 0,4 %) зафиксировано в поверхностном слое ДО Белой губы (станция I-21). На этой станции отмечены максимальные концентрации — 4900–5200 мкг/г (0,5 %) — в толще ДО исследуемых станций оз. Имандра в слое 2–7 см. На всей южной акватории Большой Имандры и вблизи Йокостровского пролива в поверхностном слое ДО содержание Sr превышает 1000 мкг/г, то есть более чем в 20 раз выше средней фоновой концентрации в ДО озер Мурманской области. В Йокостровской Имандре после довольно быстрого течения в Йокостровском проливе скорость течения резко падает, образуется своеобразный механический барьер, и в относительно спокойных условиях вблизи пролива происходит осаждение крупно- и тонкодисперсного материала, поступающего, в том числе и с апатитоневелинового производства. На остальных станциях Йокостровской Имандры содержание стронция в поверхностном слое ДО лежит в пределах от 70 до 620 мкг/г, то есть выше, чем среднее фоновое значение.

В Бабинской Имандре концентрации Sr еще ниже и находятся в диапазоне от 40 до 80 мкг/г, то есть сопоставимы с фоновыми содержаниями этого щелочноземельного металла. Средние содержания Sr в поверхностном слое донных отложений по отдельным плесам четко дают распределение этого металла в зависимости от наличия источника поступления: наибольшее значение (1100 мкг/г) зафиксировано в Большой Имандре, затем следует Йокостровская Имандра (610 мкг/г), наименьшее содержание отмечено в Бабинской (70 мкг/г) (табл. 7.10), а максимальное среднее содержание среди губ установлено для Белой губы — 2000 мкг/г.

В начале 1970-х гг. в результате гидрохимической съемки Йокостровской и Бабинской Имандры (Комплексное изучение Йокостровской..., 1976; Чижиков, 1980) были получены первые сведения о содержании хрома в донных отложениях озера (см. табл. 7.10), тогда этот показатель варьировал от 1 до 150 мкг/г, со средним значением 100 мкг/г. Следует напомнить, что содержание элементов в то время определялось полуколичественным спектральным анализом, поэтому был зафиксирован такой значительный разброс значений. В начале 1980-х гг. в Белой губе содержание Cr находилось в меньшем диапазоне — от 15 до 50 мкг/г со средним значением 33 мкг/г (Моисеенко, Яковлев, 1990). В Бабинской Имандре в это время среднее содержание Cr в ДО составляло около 80 мкг/г, диапазон значений — от 66 до 91 мкг/г. В 1990-х гг. была получена реальная картина распределения этого металла в ДО по всей акватории озера, когда четко было установлено, что комбинат «Североникель» является источником загрязнения (см. табл. 7.10), так как в металлургическом переделе, наряду с другими минералами, участвует такой хромсодержащий минерал, как хромит $FeCr_2O_4$ (Mineralogy..., 1999). В Монче-губе было зафиксировано максимальное содержание Cr — 180 мкг/г, что почти в 3 раза превышает среднее фоновое. Далее по мере распространения потока по стоковому течению количество хрома в воде снижается и в целом по Большой Имандре среднее содержание равно 68 мкг/г, в Йокостровской — 59 мкг/г, в Бабинской — 66 мкг/г. Эти показатели сопоставимы с фоновыми для данного элемента. Выделяется незначительное увеличение содержания хрома в губе Кунчаст, что может быть связано с притоком речных вод, им обогащенных.

Исследования донных отложений оз. Имандры, проведенные в 2000-х гг., подтвердили предыдущие выводы: стоки комбината «Североникель» — главный источник поступления Cr в озеро (см. табл. 7.10). В ДО Монче-губы отмечено повышенное содержание Cr в поверхностных слоях до 175 мкг/г, а на остальной акватории Большой и Йокостровской Имандры его содержание варьирует в пределах от 20 до 60 мкг/г, в то время как в ДО Бабинской Имандры больше — от 73 до 88 мкг/г. В целом по плесам озера вырисовывается специфическая для этого тяжелого металла картина, когда его среднее содержание в ДО отдельно по Большой, Йокостровской и Бабинской Имандре установлено равным 65, 43 и 82 мкг/г соответственно (см. табл. 7.10).

Несмотря на то, что стоки комбината «Североникель» являются главным источником поступления антропогенного хрома, не Большая, а Бабинская Имандра имеет наибольшее среднее содержание Cr, что, возможно, указывает на другие источники его поступления, в том числе и природные. Это заключение подтверждается повышенным содержанием хрома в губах Кунчаст и Уполокша, в которые впадают притоки озера, несущие загрязненные этим элементом воды.

Достоверная информация о содержании алюминия в донных отложениях оз. Имандра появилась только после организации ИППЭС КНЦ РАН в 1989 г. и проведения широкомасштабных исследований химического состава ДО озер Мурманской обл. и европейской арктической зоны в целом. В 1990-е гг. было установлено максимальное содержание Al (до 5 %) в ДО Белой губы и южной части Большой Имандры (табл. 7.11), что говорит о преобладающей роли стоков АО «Апатит» в формировании повышенного содержания этого металла, который входит в состав перерабатываемых на объединении минералов, например, в нефелин $(Na, K)AlSiO_4$.

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания алюминия и фосфора (%) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Алюминий			Фосфор		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	–	–	–	< 0,10	6,50	1,00
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	1,05	5,00	2,42	–	–	–
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	1,47	5,35	3,62	0,02	1,53	0,72
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	1,05	1,91	1,49	–	–	–
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	1,47	2,42	1,95	0,02	0,04	0,04
Белая губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	0,78	0,84	0,82
Белая губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Белая губа ^{2*}	1993–1998	4,13	4,13	4,13	–	–	–
Белая губа ^{3*}	2007–2012	4,30	5,29	4,88	1,12	1,53	1,25
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	1,45	3,02	2,34	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	1,47	4,23	2,50	0,16	0,87	0,44
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	–	–	–	–	–	–
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	1,61	2,62	2,15	–	–	–
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	2,20	2,47	2,33	0,08	0,18	0,11

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980.

На остальной акватории Большой Имандры, в том числе в Монче-губе, куда поступают стоки комбината «Североникель», концентрации алюминия не превышают 2 %. В восточной части Йокостровской Имандры, где происходит осаждение материала, поступившего со стоками АО «Апатит», содержание этого элемента находится в пределах от 2 до 3 %, в западной части Бабинской Имандры, принимающей речные воды с водосбора озера (в губах Кунчаст и Уполокша), его содержание повышено — до 2,6 %, на остальной акватории Йокостровской и Бабинской Имандры оно не превышает 2 % (см. табл. 7.11).

Наглядное подтверждение предположения о том, что именно образующиеся в результате апатитонефелинового производства (АО «Апатит») стоки — главные источники поступления алюминия (как, впрочем, и стронция) в оз. Имандра, дает территориальное распределение его значений (в процентах) в поверхностном слое (0–1 см) ДО оз. Имандра в 2000-е гг. (табл. 7.11).

Наибольшее содержание Al зафиксировано в поверхностном слое ДО станций Белой губы (5,35 %) и южной части Большой Имандры, на всех остальных станциях Большой Имандры в поверхностном слое ДО показатель не превышает 2,4 %, что сопоставимо со средним фоновым содержанием этого металла в ДО озера. В Йокостровской Имандре, вблизи пролива, концентрации Al в поверхностном слое ДО более 3 %. Здесь, как было неоднократно сказано, после довольно быстрого течения в Йокостровском проливе скорость течения резко падает, образуется своеобразный механический барьер, а далее в относительно спокойных условиях происходит осаждение поступающего с апатитонефелинового производства крупно- и тонкодисперсного материала с высоким содержанием Al, Sr и других сопутствующих этому производству элементов. На остальной акватории Йокостровской Имандры содержание в поверхностном слое ДО варьирует в пределах от 1,5 до 2,4 %, что сопоставимо со средним фоновым значением. В Бабинской Имандре этот показатель имеет еще более узкий диапазон — от 2,2 до 2,5 %, что говорит о едином источнике поступления этого металла, которым на данной акватории озера является речной сток, то есть алюминий здесь в основном поступает в составе речных вод. В целом по плесам озера его наибольшее среднее содержание (3,6 %) отмечено в Большой Имандре вследствие поступления сточных вод АО «Апатит», а в Йокостровской и Бабинской Имандре средний показатель примерно одинаков — 2,5 и 2,3 % соответственно (см. табл. 7.11).

Первые сведения о содержании фосфора в поверхностных ДО Большой Имандры относятся к началу 1960-х гг., тогда было установлено, что вблизи Белой губы оно превысило 1000 мкг/г, Бабинской Имандры — 60–70 мкг/г (Баранов, 1966). Первые детальные исследования содержания P в ДО оз. Имандра, в ее северной части — Большой Имандры, были проведены сотрудниками Кольского филиала АН СССР в 1966–1968 гг. (Комплексное изучение..., 1971). В результате было установлено, что среднее содержание фосфора равно 1 %, с максимальными концентрациями (6,5 %) в Белой губе и южной части Большой Имандры, куда поступают стоки апатитонефелинового производства, содержащие минерал апатит ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH},\text{F},\text{Cl})_2$), в состав которого входит фосфор. На остальной акватории Большой Имандры его содержание менее 1 %. В результате гидрохимической съемки 2000-х гг. установлено, что его концентрации, как и у Hg, Sr, Al, в поверхностном слое ДО плеса Большая Имандра выше, чем в Йокостровской (см. табл. 7.11).

В Белой губе и южной части Большой Имандры содержание Р находится в диапазоне от 1,06 до 1,53 %, что на порядок выше среднего фонового значения. В Большой Имандре, в северном направлении, происходит уменьшение содержания Р по направлению распространения потока загрязнения от главного источника загрязнения на этой акватории оз. Имандра — АО «Апатит», что говорит в пользу того, что именно сточные воды объединения являются причиной увеличения содержания Р в ДО озера. Его уменьшение отмечается на акватории Йокостровской Имандры, где загрязненные воды, поступающие из Большой Имандры, разбавляются водами из Тик-губы, находящейся за пределами потока распространения загрязняющих веществ. Наименьшее содержание фосфора зафиксировано в поверхностном слое ДО Бабинской Имандры, которая расположена вне зоны прямого поступления загрязненного фосфором взвешенного вещества от апатитоневелинового производства. В среднем по плесам озера распределение Р соответствует описанной закономерности распределения этого элемента от источника загрязнения — АО «Апатит»; наибольшее среднее содержание зафиксировано в Большой Имандре (0,72 %), а далее в плесах Йокостровской и Бабинской Имандры концентрации снижаются до 0,44 и 0,11 % соответственно (см. табл. 7.11).

Достоверные результаты присутствия щелочного металла калия в ДО оз. Имандра появились только после организации ИППЭС КНЦ РАН в 1989 г. и проведения широкомасштабных исследований химического состава ДО озер Мурманской обл. и европейской арктической зоны в целом. В 1990-е гг. максимальное содержание (до 1 %) этого элемента установлено в ДО Белой губы и южной и центральной части Большой Имандры (табл. 7.12). Это говорит о преобладающей роли стоков АО «Апатит» в формировании повышенного содержания данного металла, который входит в состав перерабатываемых на объединении таких минералов, как, например, нефелин $(\text{Na},\text{K})\text{AlSiO}_4$. На остальной акватории Большой Имандры, в том числе в Монче-губе, куда поступают стоки комбината «Североникель», концентрации калия не превышают 0,2 %. В восточной части Йокостровской Имандры, недалеко от пролива, где происходит осаждение материала, поступившего со стоками АО «Апатит», его содержание варьируется в пределах от 0,25 до 0,4 %.

В западной части Бабинской Имандры, принимающей речные воды с водосбора озера (в губах Кунчаст и Уполокша), отмечаются повышенные содержания К (0,25–0,37 %), на остальной акватории Йокостровской и Бабинской Имандры данный показатель не превышает 0,14 %, что сопоставимо со средним фоновым в ДО оз. Имандра (табл. 7.12).

В 2000-х гг. концентрации К, как и Hg, Sr, Al, P, в поверхностном слое донных отложений существенно выше в Большой Имандре, чем в Йокостровской (см. табл. 7.12), особенно в Белой губе и южной части плеса, где содержание этого элемента находится в диапазоне от 0,48 до 0,79 %. В Большой Имандре концентрации К уменьшаются к северу, по направлению распространения потока загрязнения с максимальным содержанием, то есть от главного источника загрязнения на этой акватории оз. Имандра — АО «Апатит», это лишний раз подтверждает факт, что именно сточные воды объединения являются причиной увеличения содержания калия в ДО озера.

Таблица 7.12

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания калия и натрия (%) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Калий			Натрий		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	–	–	–	–	–	–
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	0,13	0,94	0,37	0,04	1,51	0,47
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	0,24	0,79	0,46	0,07	1,47	0,53
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	0,14	0,19	0,17	0,08	0,71	0,37
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	0,28	0,32	0,30	0,24	1,47	0,84
Белая губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	0,96	1,67	1,31
Белая губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Белая губа ^{2*}	1993–1998	0,37	0,94	0,65	0,66	1,51	0,97
Белая губа ^{3*}	2007–2012	0,48	0,79	0,62	0,33	0,93	0,56
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	–	–	–	0,01	3,00	2,00
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	0,03	0,49	0,22	0,02	0,17	0,09
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,16	0,51	0,28	0,04	0,24	0,12
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	–	–	–	–	–	–
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	0,13	0,37	0,23	0,04	0,06	0,05
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,35	0,40	0,37	0,06	0,07	0,07

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980.

В северной части Большой Иmandры содержание К варьируется от 0,24 до 0,32 %. В Йокостровской Иmandре, вблизи пролива, оно повышенное — 0,4–0,5 %, в западной части Бабинской Иmandры, принимающей речные воды с водосбора озера (губы Кунчаст и Уполокша), наблюдается примерно такая же ситуация (до 0,4 %). Минимальные концентрации, не превышающие 0,2 %, что сопоставимо со средними фоновыми, отмечаются в центральной части Йокостровской Иmandры, где происходит разбавление загрязненных вод, поступающих из Большой Иmandры, водами с самым малым содержанием этого элемента в Тик-губе, находящейся за пределами потока распространения загрязняющих веществ.

После гидрохимической съемки в начале 1970-х гг. были получены первые данные о присутствии натрия в ДО оз. Иmandра. Тогда было установлено, что содержание этого металла в ДО Йокостровской и Бабинской Иmandры находится в диапазоне от 0,01 до 3,0 %, среднее значение — 2 % (см. табл. 7.12). Щелочной металл Na является составной частью минералов, перерабатываемых на объединении «Апатит», например нефелина $(Na,K)AlSiO_4$. В содержаниях выше обычного он также присутствует в горных породах Хибинского щелочного массива, в том числе и в сырье, перерабатываемом на объединении, именно этим можно объяснить повышенные концентрации Na (до 1,5 %) в поверхностном слое ДО Белой губы и южной части Большой Иmandры в 1990-е гг. (табл. 7.12). Повышенное присутствие Na фиксируется также в Монче-губе и прилегающей акватории центральной части Большой Иmandры, чему объяснением является использование соды (Na_2CO_3) для повышения величины pH и осаждения таким образом солей тяжелых металлов в отстойнике (оз. Нюдъявр) сточных вод комбината «Североникель». В Йокостровской Иmandре, вблизи пролива, зафиксировано небольшое повышение содержания Na в ДО — до 0,17 %, что составляет 2 фоновых значения. В остальной части Йокостровской и Бабинской Иmandры его концентрации находятся в пределах от 0,02 до 0,08, что сопоставимо или даже меньше среднего фонового значения в ДО оз. Иmandра.

В 2000-х гг. концентрации Na, как и Hg, Sr, Al, P, K, существенно выше в поверхностном слое ДО Большой Иmandры, чем Йокостровской и Бабинской (см. табл. 7.12). В Белой губе и южной части Большой Иmandры его содержание колеблется в диапазоне от 0,33 до 0,93 %. Высокие значения (до 1,5 %) зафиксированы в ДО Монче-губы, куда поступают стоки комбината «Североникель». В Большой Иmandре наблюдается снижение содержания Na по направлению распространения потока от акваторий с максимальным загрязнением, то есть от источников, его создающих, — АО «Апатит» и комбината «Североникель», что говорит в пользу того, что именно сточные воды этих предприятий являются причиной увеличения содержания Na в ДО озера. На севере Большой Иmandры в губе Куреньга его содержание не превышает 0,1 %. Повышенные концентрации Na (до 0,24 %) зафиксированы в акватории после Йокостровского пролива, где происходит осаждение материала, поступающего из Большой Иmandры, минимальные (в пределах от 0,04 до 0,1 %) — отмечаются в ДО Йокостровской и Бабинской Иmandры, где происходит разбавление загрязненных вод, поступающих из Большой Иmandры, в том числе и в Тик-губе, которая находится за пределами потока распространения загрязняющих веществ. Показатели по отдельным плесам отражают уменьшение содержания Na в ДО

от Большой Имандры и далее в Йокостровской и Бабинской: среднее значение составляет 0,53, 0,12 и 0,07 % соответственно (см. табл. 7.12).

В начале 1970-х гг. была проведена гидрохимическая съемка оз. Имандра (Комплексное изучение..., 1971), в результате которой были получены первые сведения о наличии кальция в ДО: в Йокостровской и Бабинской Имандре он находился в пределах от 0,3 до 10 %, со средним значением 2,8 % (табл. 7.13). В начале 1980-х гг. среднее содержание Са (1,92) в ДО Белой губы превышало более чем в 3 раза таковое в Монче-губе (0,58 %), что указывало на то, что деятельность АО «Апатит» является источником поступления Са в озеро.

Исследования 1990-х гг. подтвердили, что стоки АО «Апатит» — источник поступления Са. Установлено, что в Белой губе, в южной и центральной части Большой Имандры, то есть в местах, куда поступают стоки апатитонепелинового производства, содержащие минерал апатит, были отмечены наибольшие концентрации Са — 2,18–3,44 % (табл. 7.13). Зафиксировано также, что в губах Монче и Куреньга содержания этого металла повышенные, что является следствием поступления сточных вод Оленегорского ГОКа и комбината «Североникель», в которых присутствует кальций, так как именно там осуществляется переработка горных пород с повышенным содержанием этого щелочноземельного металла.

В Йокостровской Имандре, сразу же после пролива, отмечается высокое содержание Са (до 1,45 %), потому что снижение скорости течения и создающиеся благодаря этому спокойные гидродинамические условия способствуют осаждению тонкодисперсных частиц, богатых Са, поступающих со стоком АО «Апатит» (табл. 7.13). Содержание Са несколько повышено (до 0,28 %) в ДО губы Камка, куда, вероятно, поступают речные воды, обогащенные этим металлом, а также в ДО Зашеечной губы, где создаются специфические гидродинамические условия, в первую очередь замедление скорости потока перед препятствием в виде плотины в истоке реки Нивы. На остальной акватории Йокостровской и Бабинской Имандры его концентрация колеблется в пределах от 0,02 до 0,14 %, что сопоставимо с фоновой.

Результаты исследования ДО озера в 2000-х гг. еще раз подтвердили тот факт, что стоки АО «Апатит» — главный поставщик избыточного кальция (табл. 7.13). Обнаружено, что его содержание в ДО Белой губы и южной части Большой Имандры наибольшее и варьирует в диапазоне от 2 до 3 %, среднее составляет 2,7 %. Оно также повышенное (до 1,1 %) в поверхностном слое ДО губы Куреньга, что отражает влияние деятельности Оленегорского ГОКа. В Монче-губе ДО не обогащены Са, его концентрации не превышают 0,4 %. В Йокостровской Имандре, сразу же после пролива, отмечены довольно высокие показатели этого металла — 1,12–2,12 %, что, как уже было неоднократно сказано, объясняет специфические гидродинамические условия данной акватории, где происходит осаждение обогащенного основными петрогенными элементами, в том числе и Са, тонкодисперсного материала, поступающего со стоками АО «Апатит». На остальной акватории Йокостровской и Бабинской Имандры содержание кальция не превышает 1 % и соответствует фоновому показателю. Было также установлено, что в 2000-х гг., по сравнению с 1990-ми, в ДО всех плесов озера концентрация Са выросла — отражение аккумулярующего эффекта накопления элементов, отмеченного для тяжелых металлов. Так, его среднее содержание в плесах Большой, Йокостровской и Бабинской Имандры увеличилось с 1,24 до 1,69, 0,59 до 1,23 и с 0,12 до 0,68 % соответственно (см. табл. 7.13).

Минимальное (min), максимальное (max) и среднее (average) содержания кальция и магния (%) в поверхностных ДО различных плесов оз. Имандра за последние 50 лет

Плес озера	Период, годы	Кальций			Магний		
		min	max	average	min	max	average
Большая Имандра ^{1*}	1966–1968	–	–	–	–	–	–
Большая Имандра ^{2*}	1993–1998	0,03	3,44	1,24	0,26	1,44	0,50
Большая Имандра ^{3*}	2007–2012	0,01	2,96	1,69	0,36	1,05	0,57
Монче-губа ^{4*}	1981–1984	–	–	–	–	–	–
Монче-губа ^{5*}	1983–1985	0,27	0,85	0,58	1,43	2,36	2,05
Монче-губа ^{2*}	1993–1998	0,03	0,57	0,32	0,26	0,76	0,45
Монче-губа ^{3*}	2007–2012	0,01	0,41	0,20	0,64	0,92	0,77
Белая губа ^{4*}	1981–1984	1,13	2,71	1,92	1,67	2,15	1,91
Белая губа ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Белая губа ^{2*}	1993–1998	0,91	2,61	1,90	0,26	0,42	0,35
Белая губа ^{3*}	2007–2012	2,03	2,96	2,68	0,36	0,45	0,40
Йокостровская и Бабинская Имандра ^{6*}	1971–1975	0,30	10,00	2,82	0,10	3,00	1,04
Йокостровская Имандра ^{5*}	1983–1985	–	–	–	–	–	–
Йокостровская Имандра ^{2*}	1993–1998	0,05	1,45	0,59	0,08	0,32	0,22
Йокостровская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,18	2,31	1,23	0,21	0,33	0,28
Бабинская Имандра ^{4*}	1981–1984	–	–	–	–	–	–
Бабинская Имандра ^{2*}	1993–1998	0,02	0,28	0,12	0,32	0,73	0,48
Бабинская Имандра ^{3*}	2007–2012	0,62	0,74	0,68	0,68	0,80	0,74

Примечания: ^{1*} — Комплексное изучение..., 1971; ^{2*} — Антропогенные модификации..., 2002; ^{3*} — исследования ИППЭС КНЦ РАН последних лет; ^{4*} — Моисеенко, Яковлев, 1990; ^{5*} — Крючков, Моисеенко, 1987; ^{6*} — Комплексное изучение Йокостровской..., 1976, Чижиков, 1980.

Первые данные о присутствии магния в ДО озера были получены в результате гидрохимической съемки в начале 1970-х гг. (Комплексное исследование..., 1971), когда было установлено, что его среднее содержание в ДО Йокостровской и Бабинской Имандры равно 1,04 %, а диапазон концентраций — от 0,1 до 3,0 % (см. табл. 7.13).

В начале 1980-х гг. концентрации этого металла в ДО губ Монче и Белая были примерно одинаковы, в среднем составляя 2,05 и 1,91 % (Крючков, Моисеенко, 1987; Моисеенко, Яковлев, 1990) и варьируясь в пределах 1,43–2,35 и 1,67–2,15 % соответственно (табл. 7.13). Химический анализ ДО в это время, как уже было сказано, проводился методом полуколичественного спектрального анализа, поэтому его результаты, по сравнению с полученными методом атомной абсорбции, могут быть завышены. Еще одно объяснение большим значениям может быть таким: спектральным методом анализировались пробы ДО в прокаленном виде, то есть твердый материал, а методом атомной абсорбции анализируется раствор, полученный после обработки проб донных отложений концентрированной азотной кислотой, и в раствор не переходит материал из кристаллической матрицы, в нее в основном входят минералы петрогенных элементов, в том числе и Mg, а также описанные ранее Sr, Al, P, K, Na.

По результатам исследований 1990-х гг. было установлено, что концентрации Mg тоже, как и у Hg, Sr, Al, P, K, Na, в поверхностном слое ДО существенно выше в плесе Большая Имандра, чем в плесе Йокостровская Имандра (см. табл. 7.13). На исследуемых станциях Большой Имандры содержание этого элемента находится в диапазоне от 0,26 до 1,44 %, со средним значением 0,5 % (табл. 7.13). Максимальный показатель отмечен в ДО Куреньга губы, что говорит о том, что сточные воды Оленегорского ГОКа — источник его поступления в озеро, другим источником загрязнения является также комбинат «Североникель», что подтверждают повышенные концентрации (до 1,1 %) металла в ДО Монче-губы и прилегающей акватории (см. табл. 7.13). В Большой Имандре его содержание снижается по направлению распространения потока загрязнения от северной части с максимальными значениями в южном направлении. Минимальные концентрации (от 0,08 до 0,18 %) отмечаются в центральной части Йокостровской Имандры. В западной части Бабинской Имандры, принимающей речные воды с водосбора озера (в губах Кунчаст и Уполокша), наблюдаются повышенное присутствие магния (до 0,73 %). Таким образом, установлено, что деятельность АО «Апатит», а именно сточные воды объединения, не являются причиной увеличения содержания магния в ДО оз. Имандра, источники его поступления в водоем связаны с деятельностью предприятий металлургического комплекса — комбината «Североникель» и Оленегорского ГОКа. Минимальное содержание магния, как и других щелочных и щелочноземельных металлов, отмечается на станциях Йокостровской Имандры, где происходит разбавление загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры.

Наибольшие содержания магния в поверхностном слое ДО оз. Имандра в 2000-х гг. зафиксированы в губах Куреньга и Монче — 1,05 и 0,92 % соответственно. Таким образом, виновники его поступления — Оленегорский ГОК и комбинат «Североникель». В Белой губе и южной части Большой Имандры содержание Mg меньше в 2–3 раза и колеблется от 0,36 до 0,45 %. Несмотря на то, что стоки комбината «Апатит» оказывали «разбавляющее» воздействие на содержание Mg в ДО оз. Имандра и за период их влияния накопилась толща ДО с меньшими концентрациями, в Большой Имандре показатели металла, содержащегося в поверхностных слоях ДО, в целом выше, чем в Йокостровской

Имандре (см. табл. 7.13). В Йокостровской Имандре концентрации магния наименьшие в озере — от 0,21 до 0,32 %. В губах Кунчаст и Уполокша Бабинской Имандры, принимающих речные воды с водосбора озера, отмечаются повышенные содержания магния — 0,8 и 0,74 % соответственно. Что же касается среднего содержания данного элемента, то в поверхностном слое ДО Бабинской Имандры оно выше, чем Большой, наименьшие концентрации зафиксированы в Йокостровской Имандре — 0,74, 0,57 и 0,28 % соответственно (см. табл. 7.13).

Как было отмечено ранее в описании результатов исследований, распределению элементов в поверхностном слое ДО оз. Имандра свойственны общие закономерности формирования химического состава. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава поверхностных ДО, были проведены корреляционный и факторный анализы с использованием пакета Statistica (Version 6.0).

Корреляционный анализ (табл. 7.14) химического состава поверхностных ДО оз. Имандра четко показал две группы металлов: в первую вошли тяжелые (Ni, Cu, Co, Cd, Pb, As, Hg, Cr), во вторую — щелочные и щелочноземельные (K, Na, Sr, Ca), а также Al и P, которые поступают в озеро из двух различных источников (комбинат «Печенганикель», и АО «Апатит»). Антропогенный фактор, то есть загрязнение среды промышленными предприятиями, является определяющим в процессах формирования химического состава ДО оз. Имандра — самого большого водоема Мурманской обл. К первой группе элементов (тяжелые металлы) присоединяется ППП — косвенный показатель содержания органического материала в ДО, что говорит о том, что органическое вещество в озере является аккумулятором тяжелых металлов. Эта способность описана во многих публикациях, касающихся роли определяющих факторов в аккумуляции элементов первой группы в ДО (например, Horowitz, 1991). Из состава группы выбыл цинк, который, в силу своих геохимических особенностей, коррелирует только со стронцием. В результате исследований установлено, что и комбинат «Североникель», и АО «Апатит» являются одними из основных источников поступления цинка в озеро. Магний коррелирует с ТМ, потому что, как ранее показано, источники его поступления в повышенных концентрациях — Оленегорский ГОК и комбинат «Североникель».

Факторным анализом (табл. 7.15) выявлены определяющие факторы, влияющие на формирование химического состава поверхностного слоя ДО оз. Имандра. К первому из них, имеющему наибольший вес (44 %), относится влияние стоков комбината «Североникель»: здесь высокие отрицательные значения коэффициентов характерны для элементов, поступающих со стоками комбината «Североникель», — Ni, Cu, Co, Cd, Pb, As, Hg, а также Mg, концентрации которого, как было сказано выше, коррелируют с содержаниями ТМ. В этом же факторе высокие коэффициенты имеет содержание органического материала (ППП), который является важным сорбентом ТМ в ДО оз. Имандра.

Во втором факторе, имеющем меньший по сравнению с первым фактором вес (26 %), высокими отрицательными значениями коэффициентов в факторной модели характеризуются следующие элементы: P, Ca, K, Na, Sr, Al; их источником поступления является апатитнефелиновое производство, то есть АО «Апатит». В этом факторе высокий положительный (что говорит о другом источнике поступления) коэффициент выявлен для железа — элемента, поступающего, главным образом, со стоками Оленегорского ГОКа.

Таблица 7.14

Коэффициенты корреляции (r) между концентрациями элементов и значениями влажности, ППП в поверхностных ДО оз. Имандра. Корреляционная связь достоверно устанавливается (отмечена полужирным шрифтом) при $r > 0,47$ ($p < 0,01$) при выборке $n = 29$

	Влажность	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	Mn	Fe	Sr	Cr	Al	As	Hg	P	K	Na	Ca	Mg
Влажность	1,00																			
ППП	0,41	1,00																		
Cu	0,20	0,75	1,00																	
Ni	0,17	0,70	0,99	1,00																
Zn	0,05	0,08	0,27	0,26	1,00															
Co	0,17	0,71	0,99	1,00	0,25	1,00														
Cd	0,22	0,70	0,95	0,93	0,26	0,95	1,00													
Pb	0,20	0,66	0,94	0,91	0,20	0,94	0,95	1,00												
Mn	-0,37	-0,30	-0,27	-0,24	-0,06	-0,22	-0,19	-0,25	1,00											
Fe	-0,33	-0,36	-0,27	-0,24	-0,08	-0,21	-0,18	-0,17	0,65	1,00										
Sr	0,11	-0,16	-0,20	-0,20	0,62	-0,22	-0,24	-0,39	-0,15	-0,28	1,00									
Cr	-0,02	0,42	0,78	0,78	0,07	0,80	0,73	0,87	-0,16	-0,06	-0,58	1,00								
Al	0,04	-0,26	-0,21	-0,21	0,31	-0,23	-0,28	-0,40	-0,16	-0,31	0,86	-0,50	1,00							
As	0,04	0,62	0,95	0,98	0,25	0,97	0,90	0,83	-0,09	-0,09	-0,13	0,72	-0,10	1,00						
Hg	0,28	0,62	0,90	0,90	0,30	0,89	0,83	0,75	-0,35	-0,32	0,10	0,54	0,14	0,88	1,00					
P	0,08	-0,22	-0,28	-0,28	0,21	-0,29	-0,32	-0,48	-0,15	-0,25	0,84	-0,66	0,91	-0,20	0,06	1,00				
K	-0,08	-0,39	-0,14	-0,14	0,30	-0,14	-0,16	-0,25	-0,16	-0,41	0,74	-0,28	0,92	-0,11	0,11	0,77	1,00			
Na	0,16	0,36	0,54	0,50	0,30	0,52	0,68	0,53	-0,30	-0,65	0,20	0,25	0,24	0,18	0,42	0,20	0,43	1,00		
Ca	-0,06	-0,49	-0,44	-0,44	0,24	-0,44	-0,47	-0,59	0,07	-0,22	0,84	-0,67	0,91	-0,29	-0,05	0,92	0,80	0,12	1,00	
Mg	-0,23	0,18	0,49	0,50	0,13	0,50	0,45	0,54	0,20	0,03	-0,39	0,74	-0,27	0,42	0,31	-0,47	-0,07	0,10	-0,40	1,00

В третьем факторе высокий коэффициент отмечается для влажности (вес 9 %), что говорит о важной роли физических параметров, а следовательно, сорбционной способности ДО в аккумуляции элементов, главным образом тяжелых металлов. Чем выше влажность, тем больше дисперсного материала, обладающего высокими сорбционными характеристиками, находится в ДО. Таким образом, в факторной модели четко выделились три основных источника, имеющие наибольшее влияние на формирование химического состава современных ДО оз. Имандра: это стоки апатитонелефинового (АО «Апатит») и металлургического (комбинат «Североникель» и Оленегорский ГОК) производства, поступающие в озеро в большом количестве, и элементы, перерабатываемые на предприятиях.

Таблица 7.15

Факторная модель химического состава поверхностного слоя ДО оз. Имандра

Параметры, элементы	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина	0,292	0,091	0,624
Влажность	-0,003	0,036	0,830
ППП	-0,755	-0,012	0,295
Cu	-0,958	-0,269	0,003
Ni	-0,941	-0,250	-0,047
Zn	-0,098	-0,543	-0,252
Co	-0,956	-0,253	-0,022
Cd	-0,951	-0,240	0,015
Pb	-0,970	-0,071	0,045
Mn	0,179	0,317	-0,599
Fe	0,206	0,716	-0,179
Sr	0,466	-0,789	-0,096
Cr	-0,937	0,086	-0,056
Al	0,431	-0,855	-0,104
As	-0,910	-0,259	-0,048
Hg	-0,809	-0,467	0,129
P	0,557	-0,758	0,004
K	0,323	-0,847	-0,057
Na	-0,093	-0,819	0,023
Ca	0,579	-0,758	-0,006
Mg	-0,562	0,111	-0,492
Вес фактора, %	43,5	25,6	9,1

Установлено, что геохимический состав поверхностного слоя донных отложений оз. Имандра за последние 50 лет претерпел значительные изменения по всей акватории вследствие как прямого поступления сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса (Большая и Йокостровская Имандра), так и аэротехногенного загрязнения водосбора озера и ветровых нагонных течений (Бабинская Имандра). Наибольший вклад в эти преобразования химического состава ДО оказывают горнодобывающие, горно-перерабатывающие и горно-металлургические предприятия — комбинат «Североникель», АО «Апатит» и АО «Олкон». В результате металлургической деятельности концентрации

исследуемых тяжелых металлов (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, что сопоставимо с их содержанием в кондиционной руде. Установлено также влияние изменения физико-химических условий в толще воды и ДО озера на распределение железа и марганца 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 ртути в ДО акватории, прилегающей к апатитонепелиновым разработкам, отмечено аномальное увеличение содержания (почти на 2 порядка выше фонового), 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 росте содержания ТМ и других элементов в воде и ДО, но и способствовало резкому ухудшению экологического состояния озера, снижению видового разнообразия гидробионтов, упрощению их структуры, то есть смене доминирующих до этого времени форм на устойчивые к загрязнению организмы.

7.6. Накопление основных элементов-загрязнителей в озере Имандра

Оценка количества поступивших и аккумулированных в донные отложения загрязняющих элементов за период антропогенного воздействия на оз. Имандра проводилась с использованием результатов исследования вертикального распределения концентраций тяжелых металлов в толще ДО на отдельных станциях. Озеро было разделено на девять отдельных зон согласно выработанным ранее критериям (Антропогенные модификации..., 2002), в каждой зоне отбирались колонки ДО. С использованием батиметрической карты (Рихтер, 1934), были определены площади каждой зоны начиная с изобаты 10 м и глубже, потому что главные адсорбенты металлов в ДО (илы) отмечаются именно с глубины 10 м.

Для оценки накопления металлов в ДО по каждой выделенной зоне были получены усредненные данные по мощности слоя с повышенным содержанием металлов и сами эти повышенные концентрации (средние за вычетом значений фоновых по каждому элементу по каждой зоне). Объем ДО с повышенными концентрациями тяжелых металлов для каждой зоны определялся умножением площади каждой зоны (глубже изобаты 10 м) на мощность загрязненных ДО, которая определялась по вертикальному распределению загрязняющих элементов в колонках ДО, то есть там, где происходило накопление вещества со времени начала деятельности промышленных предприятий. Масса загрязненных ДО рассчитывалась соответственно для каждой зоны путем умножения объема на плотность ДО, которая в среднем принята равной $1,15 \text{ г/см}^3$ ($1,15 \text{ т/м}^3$) (Антропогенные модификации..., 2002). Масса каждого загрязняющего элемента в каждой зоне рассчитывалась умножением массы загрязненных ДО в этой зоне на средние (за вычетом фоновых значений) концентрации этого загрязняющего элемента во влажных ДО. Для этого концентрации элементов во влажных ДО рассчитывались путем умножения содержания в сухом состоянии на величины $(1 - \text{H}_2\text{O})$, где H_2O — среднее значение влажности по отдельной колонке.

Общая масса каждого загрязняющего элемента в целом для озера определялась суммированием результатов по отдельным зонам. Результаты подсчета объема и массы загрязненных ДО по зонам оз. Имандра представлены в табл. 7.16. Подсчет площади дна озера, занятого иловыми отложениями, показал, что ими занято более 57 % площади (общая площадь зеркала озера — 812,53 км²).

Таблица 7.16

Подсчет объема и массы загрязненных ДО по зонам оз. Имандра

Зона	Площадь, м ² × 10 ⁶	Мощность, м	Объем, м ³ × 10 ⁶	Масса, т × 10 ⁶
И-1	7,1	0,15	1,1	1,2
И-2	100,72	0,15	15,1	17,4
И-3	3,3	0,25	0,8	0,9
И-4	71,92	0,15	10,8	12,4
И-5	110,87	0,15	16,6	19,1
И-6	70,4	0,1	7,0	8,1
И-7	2,15	0,1	0,2	0,2
И-8	42,45	0,1	4,2	4,9
И-9	54,97	0,1	5,5	6,3
Сумма	463,9	—	61,4	70,6

Различия в мощности загрязненных ДО объясняются разной скоростью осадконакопления в отдельных зонах озера. Максимальная отмеченная нашими исследованиями мощность (25 см) зафиксирована в Белой губе (зона И-3), куда попадают стоки АО «Апатит» с повышенным содержанием взвешенных частиц. Повышенная мощность загрязненных ДО (15 см) отмечена на другой акватории Большой Имандры в зонах И-1, И-2, И-4 — в местах поступления стоков комбината «Североникель», АО «Олкон» и АО «Апатит» соответственно, содержащих относительно высокие концентрации взвешенного материала, а также в зоне И-5 Йокостровской Имандры, на которую также распространяется влияние взвесей с ОАО «Апатит». В остальных зонах мощность загрязненных ДО не превышает 10 см. Если принять во внимание, что период деятельности промышленных предприятий в пределах 80 лет, можно сказать, что скорость осадконакопления в этих зонах составляет около 2 мм/год. Этот же показатель, подобным образом рассчитанный нами ранее в оз. Куэтсъярви (Даувальтер, 2002; Dauvalter, 2003), загрязняемом стоками комбината «Печенганикель», равен 3 мм/год, большее значение скорости осадконакопления связано, вероятно, с меньшими размерами оз. Куэтсъярви.

Объем и масса загрязненных ДО наибольшие в плесе Большая Имандра (зоны И-1–И-4) и в восточной части Йокостровской Имандры (зона И-5), следовательно, здесь и накопилось максимальное количество сосредоточенных «запасов» загрязняющих ТМ. Для подсчета массы элементов (табл. 7.17) в слое загрязненных ДО необходимо учитывать их концентрации во влажных ДО, для чего средние показатели в пересчете на сухой вес умножаются на разность единицы и средней влажности в каждой колонке (в долях единицы). Для удобства расчетов значения концентраций элементов в табл. 7.17 приведены на сухой вес и в тоннах / на тонну × 10⁻⁶. Суммируя массу элементов в загрязненных ДО по отдельным зонам, получаем массу элементов по всему озеру, затем эти массы округляются, потому что очень трудно при всех вышеприведенных допущениях и осреднениях добиться результата с точностью до третьего знака.

Таблица 7.17

Расчет массы тяжелых металлов в загрязненных ДО по отдельным зонам оз. Имандра
и ее распределение по плесам озера

Зона	Масса ДО, т × 10 ⁶	H ₂ O, %	Никель		Медь		Кобальт		Цинк	
			т/т × 10 ⁻⁶	т						
И-1	1,2	88,4	15522	2203	2398	340	249	35	131	19
И-2	17,4	86,6	691	1605	113	263	15	35	5	12
И-3	0,9	72,3	309	81	124	33	12	3	23	6
И-4	12,4	82,6	588	1268	137	295	10	23	73	158
БолИ ^{1*}				79,4		80,3		80,6		85,4
И-5	19,1	86,7	429	1088	68	172	4	10	11	27
И-6	8,1	85,7	151	174	21	25	6	7	1	2
ЙокИ ^{2*}				19,4		16,9		13,8		12,6
И-7	0,2	84,3	13	1	4	0	0	0	1	0
И-8	4,9	82,7	43	36	19	16	4	3	1	1
И-9	6,3	85,5	42	39	18	17	4	4	4	4
БаБИ ^{3*}				1,2		2,8		5,6		2,0
Сумма	71			6500		1200		120		230
Сумма в 1990-х гг. ^{4*}	58			4600		960		120		250

Зона	Кадмий		Свинец		Мышьяк		Ртуть	
	т/т × 10 ⁻⁶	т						
И-1	2,91	0,41	40,1	5,7	23,5	3,3	0,479	0,068
И-2	0,31	0,73	6,4	15,0	3,2	7,4	0,027	0,062
И-3	0,15	0,04	2,6	0,7	3,6	1,0	0,214	0,056
И-4	0,11	0,24	2,5	5,5	5,5	11,8	0,338	0,728
БолИ ^{1*}		61,1		39,2		55,7		78,6
И-5	0,20	0,50	7,2	18,3	4,7	12,0	0,084	0,213
И-6	0,14	0,17	5,0	5,8	2,4	2,7	0,010	0,011
ЙокИ ^{2*}		28,5		35,2		34,8		19,3
И-7	0,00	0,00	1,0	0,0	0,1	0,0	0,001	0,000
И-8	0,11	0,09	6,3	5,3	1,9	1,6	0,001	0,001
И-9	0,16	0,15	13,2	12,1	2,6	2,4	0,026	0,024
Баби ^{3*}		10,3		25,6		9,6		2,1
Сумма		2,5		70		45		1,2
Сумма в 1990-х гг. ^{4*}		11		200		—		—

Примечания. Доля аккумуляции металла, %: ^{1*} — в Большой Имандре; ^{2*} — в Йокостровской Имандре; ^{3*} — в Бабинской Имандре; ^{4*} — по Антропогенные модификации..., 2002.

Приоритетные загрязнители Ni и Cu, а также сопутствующие им Co, Zn, Hg, накопились в ДО оз. Имандра в максимальных количествах, и их процентное распределение по плесам озера примерно одинаковое: ~ 80 % — в Большой, ~ 20 % — в Йокостровской и первые проценты — в Бабинской Имандре. Несколько по-другому распространены As и Cd: ~ 60 % — в Большой Имандре, ~ 30 % — в Йокостровской и ~ 10 % — Бабинской Имандре.

Распределение Pb отличается от распределения всех тяжелых металлов: в загрязненных ДО Большой и Йокостровской Имандры накоплено 39 и 35 % соответственно, а более 25 % в Бабинской Имандре, то есть распределение по плесам относительно равномерное. Следовательно, несмотря на то, что на долю Йокостровской и Большой Имандры приходится примерно по 40 % от общей площади озера, занятой иловыми отложениями, 60–80 % накопленных Ni, Cu, Co, Cd, Zn и As приходится на Большую Имандру, на Йокостровскую — 20–30 %, и только Pb в этих плесах накоплено в одинаковых количествах. На долю Бабинской Имандры приходится около 20 % от общей площади озера, занятой иловыми отложениями, а количество накопленных металлов в этом плесе находится в диапазоне 1–26 % (максимальное — для Pb), то есть в Бабинской Имандре накопилось меньшее количество загрязняющих ТМ.

Расположение основных источников загрязнения — предприятий горно-металлургического комплекса объясняет данную картину распределения металлов, накопленных в ДО, в отдельных плесах озера. Распределение Pb по плесам подтверждает высказанную ранее версию: данные предприятия — не единственные источники поступления в озеро этого опасного с экологической точки зрения тяжелого металла, существуют и другие источники, в первую очередь, это использование этилированного бензина и сжигание других видов топлива, главным образом угля и мазута, на энергетических установках (котельных и тепловых электростанций).

Распределение ТМ по плесам, рассчитанное на основе исследований ДО в 2000-х гг., отличается от полученного итога в начале 1990-х гг. (Накопление..., 2000). Согласно проведенным в 1990-х гг. исследованиям, приоритетные загрязняющие элементы (Ni и Cu) накопились в ДО оз. Имандра в максимальных количествах, процентное распределение этих металлов по плесам озера примерно одинаковое (~ 70 % — в Большой, ~ 30 % — в Йокостровской, первые проценты — в Бабинской Имандре). Несколько иная картина с Co и Cd: 70 % — в Большой и примерно по 15 % — в Йокостровской и Бабинской Имандре. Около 60 % Zn накопилось в Большой Имандре и примерно по 20 % — в Йокостровской и Бабинской Имандре. Приблизительно по 45 % Pb в загрязненных ДО накоплено в Большой и Йокостровской Имандре и в Бабинской — более 10 %.

Следовательно, в 2000-х гг. зафиксировано увеличение доли накопления в Большой Имандре всех приоритетных тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn и Cd), поступающих преимущественно от промышленных предприятий, а Pb показал обратную картину — уменьшение доли накопления в Большой и Йокостровской Имандре. Если сравнивать накопление этих элементов в абсолютных количествах, то, по подсчетам исследований 2000-х гг., никеля и меди накоплено больше, чем в 1990-х гг., кобальта и цинка — примерно одинаковое количество, а кадмия и свинца именно в 1990-х гг. накоплено больше, чем по результатам исследований 2000-х (табл. 7.17), что связано, скорее всего, с методикой их анализа, измененной в 2000-х гг., о чем упоминалось выше. Кроме того, в 2000-х гг. появилась возможность дополнительно определять содержание мышьяка и ртути — металлов, опасных с экологической точки зрения, распределение по зонам

которых отличается от такового приоритетных загрязняющих элементов — Ni, Cu, Co и Cd, поступающих со стоками и выбросами комбината «Североникель». Если большая часть (50–60 %) Ni, Cu, Co и Cd аккумулировалась в зонах И-1 и И-2, непосредственно примыкающих к месту сброса сточных вод комбината, то As и Hg, а также Zn в основном (на 60–85 %) накапливаются в ДО в акваториях, примыкающих к поступлению сточных вод АО «Апатит» (зоны И-3, И-4, И-5), что говорит в пользу того, что основным источником поступления последних трех металлов является именно АО «Апатит».

В настоящее время донные отложения существенным источником вторичного загрязнения воды озера никелем и медью не являются, что, однако, не снижает опасности загрязнения воды этими металлами в будущем, в особенности в плесе Большая Имандра, если, например, допустить, что комбинат «Североникель» значительно снизит выбросы никеля и меди в воду и атмосферу.

Помимо стоков и атмосферных выбросов предприятий, расположенных на водосборе озера, дополнительным источником поступления ТМ является сам водосбор озера: в почвах и растениях за почти вековой период эксплуатации предприятий накопилось значительное количество тяжелых металлов, которые после отмирания растений и в процессе миграции в почве и горных породах при главном участии подземных вод поступают в озеро. Кроме того, дополнительным источником их поступления в озеро можно назвать коммунально-бытовые стоки населенных пунктов, расположенных на водосборе озера, с учетом того факта, что возможности очистных сооружений ограничены, а их реконструкция не проводилась уже много лет.

7.7. Комплексная оценка состояния озера Имандра по результатам исследования химического состава донных отложений

Для оценки качества пресноводных объектов применяются гидробиологические и гидрохимические методы. Гидробиологические методы (например, численность и биомасса зообентоса, индекс видового разнообразия бентосных сообществ) интегрируют характеристики ДО и нагрузки загрязняющих веществ, но не всегда указывают на причины возникновения биологических эффектов. Главное преимущество гидрохимических методов — их легкая применимость и а также то, что они являются основой для подходов моделирования. Среди химических методов оценки качества ДО и экологического состояния поверхностных вод не существует прямых методов индикации биологических эффектов.

Для оценки экологического состояния поверхностных вод предлагается подход фоновых значений элементов, состоящий в определении показателей экологической опасности загрязнения по соотношению содержаний определенного элемента или соединения в поверхностном слое ДО, отражающем современное состояние водоема, к фоновому значению. Как было отмечено ранее, установление фоновых концентраций элементов в ДО — один из важных вопросов при исследовании загрязнения озер. Под фоновым значением понимается средняя величина природной вариации содержаний химического элемента. Этот показатель устанавливается на акватории (или в слоях ДО), где с большой надежностью можно предположить отсутствие антропогенных источников поступления химических элементов (Геохимия..., 1990).

Подход фоновых значений основан на сравнении данных по природным (фоновым) концентрациям загрязняющих веществ с их содержаниями в поверхностных слоях ДО. Наибольший интерес для определения фоновых значений представляют образцы, извлеченные из самых глубоких слоев ДО определенной акватории озера или ее станции. Для более достоверной оценки экологического состояния водных экосистем необходима стандартизация распределения гранулометрического состава ДО или отбор образцов с подобным им гранулометрическим составом, например, таким, как тонкодисперсный ил.

Интенсивность загрязнения водных объектов может быть оценена посредством сравнения содержания загрязняющих веществ в поверхностном и фоновом слоях ДО. Методика определения степени загрязнения водных экосистем с помощью специальных индексов описана: Л. Хокансоном (Håkanson, 1980, 1984): коэффициент (C_f) и степень (C_d) загрязнения; К. Толоненом и Т. Яаколой (Tolonen, Jaakola, 1983): коэффициент антропогенного обогащения — СЕФ; М. Оуеллетом и Х. Джонсом и П. Алхоненом (Ouellet, Jones, 1983; Alhonen, 1986): коэффициент антропогенного обогащения ДО — SAEF; Г. Мюллером (Müller, 1979): индекс геоаккумуляции — I_{geo} ; на основе научного труда (Геохимия..., 1990): суммарный показатель загрязнения — Z_c . Указанные индексы рассчитываются как отношение концентраций определенного элемента/соединения в поверхностном (чаще всего в верхнем, сантиметровом) слое к его концентрации в самом глубоком (более 20 см) слое колонки ДО определенного озера или его акватории.

Для оценки загрязнения оз. Имандра была выбрана методика Л. Хокансона (Håkanson, 1980), описание которой приводится ниже. Для установления интенсивности загрязнения токсичными веществами определяли значения коэффициента загрязнения (C_f^i):

$$C_f^i = \frac{C_{0-1}^i}{C_n^i},$$

где C_{0-1}^i — содержание вещества (i — металлы: Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, As, Hg) в поверхностном слое (0–1 см) ДО, отобранных из наиболее глубокой части акватории (зоны аккумуляции); C_n^i — доиндустриальное значение для данного вещества, определенное как среднее фоновое значение X для ДО оз. Имандра плюс одно стандартное отклонение σ_n (табл. 7.18).

Значения C_n^i были округлены, чтобы сгладить статистические погрешности. Обоснование вышеприведенного спектра металлов для определения интенсивности загрязнения основано на высокой токсичности этих веществ для гидробионтов, приоритетности их в перечне загрязняющих веществ озера, а также наличии данных по этим веществам.

Коэффициент загрязнения подсчитывается для каждого отдельного загрязняющего вещества или соединения. Если $C_{0-1}^i > C_n^i$, мы можем определить это вещество как загрязняющее или обогащенное. Если $C_{0-1}^i < C_n^i$, тогда вещество не может характеризоваться как загрязнитель.

В этом подходе придерживались следующей классификации:

$C_f^i < 1$ — низкий коэффициент загрязнения (свидетельствует о низком

загрязнении ДО изучаемым элементом);

$1 \leq C_f^i < 3$ — умеренный коэффициент загрязнения;

$3 \leq C_f^i < 6$ — значительный коэффициент загрязнения;

$C_f^i \geq 6$ — высокий коэффициент загрязнения.

Степень загрязнения (C_d) определялась как сумма всех коэффициентов загрязнения для данной станции:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i = \sum_{i=1}^n \frac{C_{0-1}^i}{C_n^i}.$$

Данный подход позволил определить коэффициент C_f^i , характеризующий загрязнение данной акватории отдельными веществами и их суммарный вклад на основе установления степени загрязнения C_d , которая, в свою очередь, показывает общее загрязнение бассейна исследуемыми веществами.

Аналогичным образом при характеристике степени загрязнения C_d , слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, мы придерживались предложенной Л. Хокансоном (Håkanson, 1980) классификации из расчета, что суммируем коэффициенты загрязнения по n -веществам:

$C_d < n$ — низкая степень загрязнения;

$n \leq C_d < 2n$ — умеренная степень загрязнения;

$2n \leq C_d < 4n$ — значительная степень загрязнения;

$C_d \geq 4n$ — высокая степень, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Выбор терминологии и ограничения между различными классами могут являться предметом для дальнейшего совершенствования.

Для характеристики экологического состояния оз. Имандра данный подход наиболее приемлем и позволяет представить характер загрязнения адекватным и стандартным

Таблица 7.18
Средние фоновые концентрации элементов (X), стандартные отклонения (σ_n) и доиндустриальные значения ($X+\sigma_n$) в ДО оз. Имандра (мкг/г сух. веса) по данным 2007–2012 гг.

Элемент	X	σ_n	$X+\sigma_n$
Ni	42	14	55
Cu	38	14	50
Zn	92	26	120
Co	17	6	25
Cd	0,15	0,07	0,25
Pb	5,1	2,6	7,5
As	4,7	3,0	7,5
Hg	0,044	0,029	0,075

для всех исследованных станций способом на основе коэффициента и степени загрязнения.

Для оценки загрязнения токсичными веществами оз. Имандра определяли значения коэффициента загрязнения по 8 элементам — Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, As, Hg, поэтому для описания степени загрязнения использовалась следующая классификация:

$C_d < 8$ — низкая степень;

$8 \leq C_d < 16$ — умеренная степень;

$16 \leq C_d < 32$ — значительная степень;

$C_d \geq 32$ — высокая степень, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Значения C_f по отдельным металлам и C_d для выбранных 8 станций оз. Имандра, описанных ранее, показаны в табл. 7.19.

Таблица 7.19

Коэффициент загрязнения (C_f) и степень загрязнения (C_d)
на исследованных станциях оз. Имандра

Станция	C_f^{Ni}	C_f^{Cu}	C_f^{Zn}	C_f^{Co}	C_f^{Cd}	C_f^{Pb}	C_f^{As}	C_f^{Hg}	C_d
Монче	549,3	119,2	2,8	21,8	25,0	11,1	16,5	13,3	759,1
Куреньга	27,7	5,2	1,0	1,1	2,3	2,0	1,4	1,1	41,8
Белая	33,8	7,4	1,1	1,7	3,3	1,8	1,8	3,2	54,1
Йокостровская	25,8	4,7	0,8	1,2	3,0	2,9	2,6	2,7	43,6
Биостанция	17,7	4,6	0,8	0,9	1,4	1,9	1,4	0,9	29,6
Зашеечная	20,8	3,2	1,8	2,5	5,9	3,2	8,0	0,8	46,1
Молочная	2,4	1,5	0,8	0,8	1,8	2,6	1,0	0,8	11,6
Уполокша	3,6	2,4	0,9	0,9	2,1	3,5	0,9	1,6	15,8

Максимальные значения коэффициента загрязнения по всем исследуемым ТМ и степени загрязнения (табл. 7.19) отмечены в Монче-губе (Большая Имандра), куда поступают стоки комбината «Североникель», содержащие металлы в повышенных концентрациях. В этой части озера все металлы (за исключением Zn) имеют высокие значения степени загрязнения C_f , для Монче-губы она равна 760, что на порядок больше, чем в других акваториях озера, на втором месте стоит Белая губа Большой Имандры, куда поступают стоки АО «Апатит», на третьем — Зашеечная губа, откуда вытекает река Нива. Плесы Большая и Йокостровская Имандра в целом вследствие загрязнения стоками и атмосферными выбросами предприятий горнопромышленного и металлургического комплекса имеют высокую степень загрязнения (за исключением биостанции, где величина C_d равна 30, что не очень далеко от пограничного значения между значительным и высоким загрязнением). На этих акваториях оз. Имандра наибольший вклад в величину степени загрязнения вносят Ni и Cu, следовательно, для них свойственны высокие (для Ni) и значительные (для Cu) значения коэффициента загрязнения. Для Co, Cd, Pb, As и Hg здесь характерны значительные и умеренные величины C_f . Низкие и умеренные значения C_f практически по всем исследуемым ТМ установлены в плесе Бабинская Имандра. На границе между значительным и умеренным находится показатель C_d в губе Уполокша, при этом значительные величины C_f здесь зафиксированы для Ni и Pb. Наименьшее (12 — умеренное) загрязнение C_d отмечено в Молочной губе, куда поступают подогретые воды Кольской АЭС.

Чтобы оценить экологическую опасность загрязнения оз. Имандра, необходимо определить степень токсичности исследуемых элементов, для чего потребуется определить коэффициент токсичности каждого рассматриваемого элемента, который должен отражать потенциальную опасность данного токсичного вещества для гидробионтов и давать информацию о комплексной

угрозе водной экосистеме по схеме воздействия: от загрязнения воды к ДО, биоте, рыбам и в итоге — к человеку (Håkanson, 1980).

Концепция коэффициента токсичности рассматривается с основной позиции — принципа превышения, то есть с позиции хорошо установленного генерального тезиса: потенциальный токсичный эффект вещества (элемента) пропорционален превышению этого вещества в окружающей среде над фоновым содержанием (Håkanson, 1980).

Этот подход основывается на следующих принципах:

1. Основной материал для оценки [согласно (Bowen, 1966)] иллюстрирует среднее содержание различных элементов в изверженных породах (1), почвах (2), воде (3), наземной растительности (4) и наземных животных (5), то есть в различных типах геологической и биологической среды (табл. 7.20).

2. Относительные содержания исследуемых элементов — Ni, Cu, Zn, Co, Pb, Cd, As, Hg (табл. 7.21) выстроены в порядок в этих пяти перечисленных в первом принципе средах. Элемент с наибольшим средним содержанием дан в значении 1 (единица). Из табл. 7.21 видно, что, например, средние концентрации Cd в 375 раз меньше, чем соответствующие значения Ni для изверженных пород.

3. Суммы относительных содержаний каждого металла в пяти средах даны в правой нижней части табл. 7.21, графа 7.

4. Чтобы сбалансировать эффект экстремальных крайних относительных содержаний, которые добавляют неподходящий вес к сумме, наибольшие для каждого элемента значения (отмечены знаком *) в табл. 7.21 не включены. Остающиеся четыре значения относительных содержаний суммировались в графе 8, в графе 9 даны суммы значений относительных содержаний, которые будут использоваться впоследствии. Эти числа получены делением на 4.1 (для Zn), что определило нижеприведенную последовательность:



Таблица 7.20

Среднее содержание различных элементов (в ppm — 10^{-6}) в изверженных породах, почвах, поверхностных водах, наземных растениях и наземных животных (из Bowen, 1966)

Элемент	Изверженные породы	Почвы	Поверхностные воды	Наземные растения	Наземные животные
Ni	75	40	0,01	3,0	0,8
Cu	55	20	0,01	14,0	2,4
Co	25	8	0,0009	0,5	0,03
Zn	70	50	0,01	100	160
Cd	0,2	0,06	0,0003	0,6	≤0,50
Pb	12,5	10	0,005	2,7	2,00
As	1,8	6	0,0004	0,2	≤0,2
Hg	0,08	0,03	0,00008	0,015	0,046

Суммы значений относительных содержаний (табл. 7.21) не эквивалентны требуемым коэффициентам токсичности. Существует два аспекта, которые должны быть рассмотрены, — это коэффициент осаждения и проблема размерности.

Таблица 7.21

Относительное содержание различных элементов в изверженных породах, почвах, поверхностных водах, наземных растениях и наземных животных (Bowen, 1966)

Порядок	Изверженные породы	Почвы	Поверхностные воды	Наземные растения	Наземные животные	Графа 7	Графа 8	Графа 9
1	1,0 — Ni	1,0 — Zn	1,0 — Zn	1,0 — Zn	1,0 — Zn			
2	1,1 — Zn	1,3 — Ni	1,0 — Cu	7,1 — Cu	67 — Cu			
3	1,4 — Cu	2,5 — Cu	1,0 — Ni	33,3 — Ni	80 — Pb			
4	3,0 — Co	5,0 — Pb	2,0 — Pb	37,0 — Pb	200 — Ni			
5	6,0 — Pb	6,3 — Co	11,1 — Co	166,7 — Cd	320 — Cd			
6	41,7 — As	8,3 — As	25,0 — As	200,0 — Co	800 — As			
7	375 — Cd	833,3 — Cd	33,3 — Cd	500,0 — As	3480 — Hg			
8	937,5 — Hg	1667 — Hg	125 — Hg	6667 — Hg	5333 — Co			
						\sum_1^5	\sum_1^4	
Ni	1,0	1,3	1,0	33,3	200*	236,6	36,6	8,9
Cu	1,4	2,5	1,0	7,1	66,7*	78,7	12,0	2,9
Co	3,0	6,3	11,1	200,0	5333,3*	5553,7	220,4	53,7
Zn	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0*	5,1	4,1	1,0
Cd	375,0	833,3*	33,3	166,7	320,0	1728,3	895,0	218,3
Pb	6,0	5,0	2,0	37,0	80,0*	130,0	50,0	12,2
As	41,7	8,3	25,0	500,0	800,0*	1375,0	575,0	140,2
Hg	937,5	1666,7	125,0	6666,7*	3478,3	12874,1	6207,4	1514,0

Коэффициент осаждения означает, что различные вещества имеют разные тенденции к осаждению в ДО. Расчет этого коэффициента, согласно работе (Förstner, Müller, 1974), производится делением природных фоновых значений для поверхностных вод на округленные фоновые значения (X) для ДО оз. Имандра (см. табл. 7.18). Принимая во внимание, что концентрации металлов в воде даны в микрограммах на литр, а в донных отложениях в микрограммах на грамм, полученные значения для изучаемых элементов умножаются на 10^3 (табл. 7.22, ПВ — концентрации металлов в поверхностных водах, мкг/л; ДО — концентрации металлов в ДО (фоновые значения), мкг/г).

Таблица 7.22
Коэффициенты осаждения (КО, 10^3)
металлов для оз. Имандра

Элемент	ПВ	ДО	КО
Ni	2,0	45	44
Cu	2,0	40	50
Zn	0,7	100	7
Co	0,1	20	5
Cd	0,04	0,2	200
Pb	0,03	5	6
As	0,1	5	20
Hg	0,002	0,05	40

Примечание. ПВ — данные (Моисеенко и др., 1997).

Согласно сведениям (табл. 7.22), As, Co, Pb и Zn имеют наименьшее отношение содержания в воде и ДО, что означает, что эти металлы в большей степени подвержены тенденции осажаться в ДО озера. Кадмий имеет высокую способность к десорбции, это означает, что относительно большое его количество может быть найдено в воде по отношению с ДО, чем остальные исследуемые металлы.

Выстроенный в ряд порядок элементов по их соотношению вода/ДО выглядит таким образом:

$Cd > Cu > Ni > Hg > As > Zn > Pb > Co$.

При анализе величины коэффициента осаждения по отдельным металлам в различных пресноводных системах следует иметь в виду, что при его подсчете использовались «условно фоновые» средние концентрации металлов в поверхностных водах, потому что в настоящее время очень трудно говорить о фоновых значениях металлов в поверхностных водах севера Финноскандии и России в силу почти векового антропогенного влияния. Обычно за условно фоновые концентрации металлов в поверхностных водах берутся наименьшие значения, но в большинстве случаев они не регистрируются инструментально, потому граничные значения принимают за условно фоновые концентрации. В особенности это касается элементов с очень низкими концентрациями, таких как Hg, Cd, Co. Более достоверными являются показатели, определенные методом ИСР для оз. Имандра (Моисеенко и др., 1997), и для расчета приняты наименьшие или средние концентрации в толще воды в апреле 1995 г., в средней части озера (зона И-5), испытывающей загрязнение, поэтому есть предположение, что в реальности фоновые концентрации будут меньше.

Теперь можно провести коррекцию коэффициента осаждения с помощью умножения на значения суммы относительных содержаний (см. табл. 7.21). Это дает следующие откорректированные значения коэффициента осаждения:

$Zn = 7, Pb = 73, Cu = 146, Co = 269, Ni = 393, As = 2805, Cd = 43659, Hg = 60\ 560$.

Мы должны дать скорректированные значения коэффициента осаждения таким образом, чтобы впоследствии эти числа можно было использовать

как седиментологический токсичный коэффициент и сравнить с коэффициентами загрязнения (C_f^i). Для этого полученные значения откорректированного коэффициента осаждения упростим, то есть разделим их на 7 — минимальное значение для Zn (так как он имеет минимальные значения для всех выделенных нами районов):

$$Zn = 1; Pb = 10; Cu = 21; Co = 38; Ni = 56; As = 401; Cd = 6237; Hg = 8651.$$

Затем извлекаем квадратные корни из этих чисел:

$$Zn = 1; Pb = 3,2; Cu = 4,6; Co = 6,2; Ni = 7,5; As = 20; Cd = 79; Hg = 93.$$

Поскольку данный метод имеет сопоставительные значения, округляем цифры и получаем значения седиментологического токсичного коэффициента (St^i) для каждого металла:

$$Zn = 1; Pb = 3; Cu = 5; Co = 6; Ni = 7; As = 20; Cd = 80; Hg = 90.$$

Хорошо известным является факт, что чувствительность организмов к токсичным веществам варьирует в зависимости от химических и биологических показателей водных экосистем. Одним из главных параметров является биопродуктивность водных экосистем (BPI) (Ahl, Wiederholm, 1977). Все металлы связаны с биопродуктивностью следующим образом: негативное действие токсичных металлов увеличивается с уменьшением биопродуктивности (Bowen, 1966; EPA, 1973, Olsson, 1977; Svenska vattenkvalitets..., 1977). Этот эффект сильнее всего проявляется у ртути, чем у других металлов.

Биопродуктивность оз. Имандра и его станций определялась по предложенной Л. Хокансоном (Håkanson, 1975, 1980) зависимости биопродуктивности (BPI) акваторий от содержания общего фосфора ($P_{общ}$) в воде, используемого как показатель трофического уровня озера (Wetzel, 1975). Она была определена Л. Хокансоном (Håkanson, 1980) по данным для шведских озер различных размеров и других лимнологических параметров (рис. 7.12).

Опираясь на значения биопродуктивности (BPI) акватории и седиментологического токсичного коэффициента (St^i) отдельного элемента, можем определить коэффициент токсичности (Tr^i) для каждого элемента (табл. 7.23).

Как было сказано выше, все металлы усиливают негативное токсичное действие с уменьшением биопродуктивности, при этом данный эффект сильнее всего проявляется у ртути, чем у других металлов, поэтому при определении Tr^i для ртути мы делим на значение BPI, а при расчете этого показателя для других металлов — на квадратный корень BPI.

Таблица 7.23
Коэффициенты токсичности (Tr^i) ТМ, загрязняющих оз. Имандра.
 St^i — седиментологический токсичный коэффициент элемента

Элемент	Озеро Имандра	
	St^i	Tr^i
Hg	90	$90 \cdot 5 / BPI$
Cd	80	$80 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$
As	20	$20 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$
Ni	7	$7 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$
Co	6	$6 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$
Cu	5	$5 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$
Pb	4	$4 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$
Zn	1	$1 \cdot \sqrt{5} / \sqrt{BPI}$

Значения коэффициента токсичности для отдельных элементов и веществ будут уточняться по мере получения новых более точных данных по фоновым концентрациям в поверхностных водах и ДО, особенно таких высокотоксичных элементов, как ртуть, кадмий, потому что в незагрязненных пресноводных системах, как ранее подчеркивалось, они находятся в очень низких концентрациях, часто не регистрируемых при современном уровне отечественного аналитического оборудования. С усовершенствованием аналитической базы также будет расширяться и перечень элементов и веществ, участвующих в оценке экологического состояния оз. Имандра, например, нужно учитывать такие токсичные вещества, как органические загрязнители: нефтепродукты, полиароматические углеводороды, хлорорганические соединения и др.

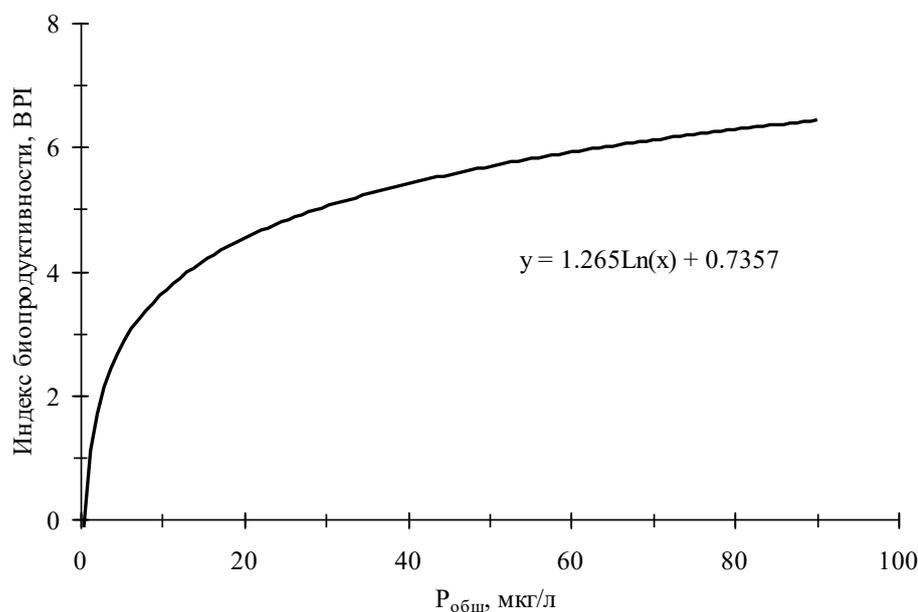


Рис. 7.12. Зависимость между содержанием общего фосфора в воде (P_{общ}) и биопродуктивностью акватории (BPI) (Håkanson, 1980)

Для количественного выражения потенциальной экологической опасности конкретного загрязняющего вещества в данной акватории мы определяли коэффициент экологической опасности (Erⁱ) по формуле, предложенной Л. Хокансоном (Håkanson, 1980):

$$Er^i = Tr^i \cdot C_f^i,$$

где Trⁱ — коэффициент токсичности для данного вещества для данного озера, станции или акватории реки или озера; C_fⁱ — коэффициент загрязнения.

Индекс потенциальной экологической опасности (RI) определяется как сумма коэффициентов экологической опасности по каждому веществу, то есть:

$$RI = \sum_{i=1}^n Er^i = \sum_{i=1}^n Tr^i \cdot C_f^i.$$

Потенциальная экологическая опасность загрязнения акватории может теперь быть описана данным количественным способом, как ранее характеризовалась и для коэффициента (C_f), и степени загрязнения (C_d).

Для характеристики коэффициента экологической опасности (E_r^i), исходя из нормативного значения $BPI = 5,0$, использовалась следующая классификация:

$E_r^i < 25$ — низкая потенциальная экологическая опасность;

$25 \leq E_r^i < 50$ — умеренная потенциальная экологическая опасность;

$50 \leq E_r^i < 100$ — значительная потенциальная экологическая опасность;

$100 \leq E_r^i < 200$ — высокая потенциальная экологическая опасность;

$E_r^i \geq 200$ — очень высокая потенциальная экологическая опасность.

Аналогичная классификация использовалась и для описания значений индекса потенциальной экологической опасности RI :

$RI < 200$ — низкая;

$200 \leq RI < 400$ — умеренная;

$400 \leq RI < 800$ — значительная;

$RI \geq 800$ — высокая.

В оз. Имандра, испытывающем воздействие сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса и хозяйственно-бытовых стоков населенных пунктов, в которых проживает треть жителей Мурманской обл., наибольшее значение индекса экологической опасности, на порядок превышающее величину RI в остальных частях озера, отмечено в Монче-губе (табл. 7.24). Очень высокие значения коэффициента экологической опасности здесь имеют Ni , Cu , Cd , As и Hg , высокое — Co , умеренное — Pb , низкое — Zn .

Таблица 7.24

Коэффициент экологической опасности (E_r) для отдельных элементов и индекс экологической опасности (RI) для станций оз. Имандра

Станция	E_r^{Ni}	E_r^{Cu}	E_r^{Zn}	E_r^{Co}	E_r^{Cd}	E_r^{Pb}	E_r^{As}	E_r^{Hg}	RI
Монче	4042	627	3	138	2101	47	347	1326	8629
Куреньга	215	29	1	7	206	9	32	116	616
Белая	220	34	1	10	247	7	33	251	803
Йокостровская	208	27	1	8	275	13	60	319	911
Биостанция	139	26	1	6	123	9	31	100	434
Зашеечная	182	20	2	19	587	16	201	113	1138
Молочная	21	10	1	6	187	13	25	116	379
Уполокша	34	16	1	7	226	19	24	258	584

По мере удаления от Монче-губы — главного источника загрязнения тяжелыми металлами — в плесе Большая Имандра, в губах Куреньга и Белая, значение индекса экологического риска снижается на порядок (см. табл. 7.24), но, согласно приведенной выше классификации, оно остается высоким для Белой губы и значительным для губы Куреньга. В этих губах никель, кадмий и ртуть (последняя — для Белой губы) имеют очень высокие значения коэффициента экологической опасности, медь и мышьяк — умеренные, остальные металлы — низкие. В Йокостровской Имандре станции (за исключением биостанции)

характеризуются высокой экологической опасностью. Очень высокую экологическую опасность здесь представляют кадмий (станция Йокостровская и Зашеечная губа), ртуть и никель (станция Йокостровская), мышьяк (Зашеечная губа). Остальные металлы имеют умеренные (Cu) и низкие (Zn, Co, Pb) значения коэффициента экологической опасности, следовательно, можно сделать вывод о том, что данные металлы, накопленные в ДО этих акваторий оз. Имандра, не представляют большой угрозы для жизнедеятельности водных организмов.

Согласно классификации Л. Хокансона, величины индекса экологической опасности в Бабинской Имандре в губах Уполокша и Молочная относятся к значительному и умеренному соответственно (см. табл. 7.24). Однако при этом очень высокую экологическую опасность в губе Уполокша представляют халькофильные ртуть и кадмий, в Молочной губе они имеют высокое значение экологической опасности. Никель и мышьяк характеризуются умеренной экологической опасности, остальные металлы — низкой.

В целом по озеру можно констатировать, что очень высокую и высокую экологическую опасность для всей акватории озера представляют халькофильные ртуть и кадмий, тогда как экологическая опасность никеля снижается по мере удаления от его поступления в Монче-губу. Экологическая опасность всех накопленных в ДО озера тяжелых металлов также уменьшается по мере удаления от Монче-губы, но остается высокой и значительной на всей акватории озера.

Чтобы проиллюстрировать достоверность и применимость определяемых значений C_d и RI, они были сравнены с оценками экологического состояния поверхностных вод по биологическим показателям гидробионтов озера — фито- и зоопланктона, зообентоса и ихтиофауны. Для этого использовались усредненные результаты за последние годы по отдельным плесам или по губам.

В оз. Имандра, подвергающемся интенсивному антропогенному влиянию, значения индекса экологической опасности имеют отрицательную корреляционную связь со значениями одного из главных показателей экологического состояния водоема — индекса сапробности сапробности (S), а также положительную корреляцию с содержанием хлорофилла «а» ($Chla$ мг/м³) и биомассы фитопланктона ($B_{\text{фито}}$, г/м³) (рис. 7.13). Высокие показатели биомассы и численности фитопланктона характерны для плеса Большой Имандры (Шаров, 2004; Исследование механизмов..., 1997). Это связано с поступлением большого количества хозяйственно-бытовых стоков в водоем. Интенсивное развитие водорослей отмечено в районах смешивания озерной воды и коммунальных стоков. Это явление характерно для Монче-губы и выхода из губы Белая. В зоне влияния сточных вод медно-никелевого производства и хозяйственно-бытовых стоков перестройка структуры планктонных сообществ происходит в русле массового развития синезеленых водорослей. В условиях высоких концентраций тяжелых металлов их численность низка и по мере распространения загрязненных вод и снижения токсичности биомасса увеличивается. В зоне влияния горнорудных производств и хозяйственно-бытовых стоков (И-3) синезеленые водоросли обнаружены в небольших количествах. Подогретые воды Кольской АЭС незначительно усиливают развитие фитопланктона, в месте их поступления преимущество для развития получает перифитон, однако сильное течение приводит к отделению от субстрата и переходу в планктон (Шаров, 2004; Денисов и др., 2015).

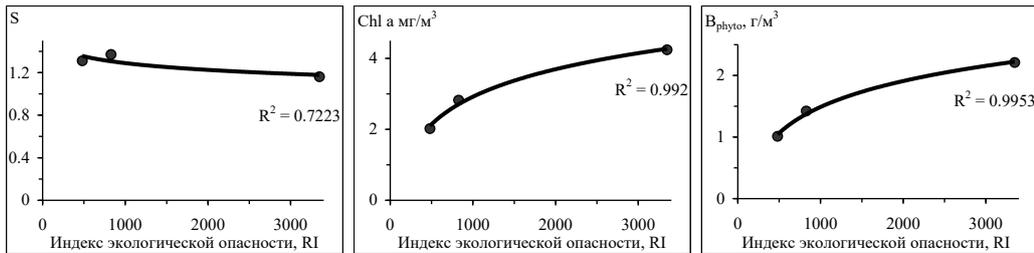


Рис. 7.13. Регрессионные зависимости индекса экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра и индекса сапробности (S), содержания хлорофилла «а» ($Chl a$ мг/м³) и биомассы фитопланктона (B_{phyto} , г/м³)

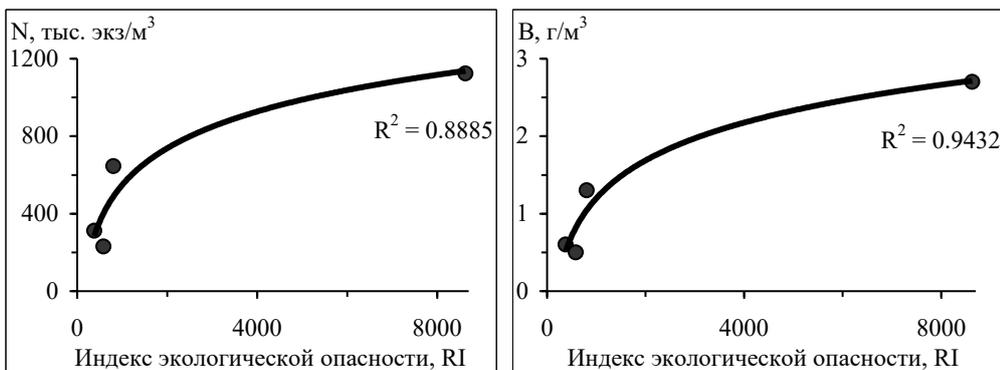


Рис. 7.14. Регрессионные зависимости индекса экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра с численностью (N , тыс. экз/м³) и биомассой (B , г/м³) зоопланктона

Значения RI в оз. Имандра имеют корреляционную связь с наиболее информативными показателями состояния зоопланктона — численностью (N , тыс. экз/м³) и биомассой (B , г/м³); с увеличением уровня загрязнения эти показатели растут (рис. 7.14), что обусловлено ростом биомассы фитопланктона (рис. 7.13). Отмечается также корреляция уровня загрязнения озера и процентного соотношения численности (N) и биомассы (B) таксономических групп зоопланктона (колловратки — Rotatoria, ветвистоусые рачки — Cladocera, веслоногие рачки — Copepoda) (рис. 7.15). С ростом загрязнения увеличивается доля колловраток, для которых характерна устойчивость к загрязнению, а еще в большей степени — доля ветвистоусых рачков. По мере удаления от источников загрязнения возрастает доля веслоногих ракообразных (Вандыш, 1998).

Отмечена высокая корреляция между индексом экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра и численностью (N , тыс. экз/м³) и биомассой (B , г/м³) зообентоса (рис. 7.16); с увеличением уровня загрязнения эти показатели увеличиваются, что связано с ростом биомассы фито- и зоопланктона (рис. 7.13 и 7.14). Количественные показатели зообентоса в первую очередь отражают трофический статус — содержание органического вещества и биогенных элементов в воде и донных отложениях. Наибольшие показатели численности и биомассы приурочены к плесу Большая Имандра. В более благополучном плесе озера (Бабинская Имандра) количественные показатели меньше.

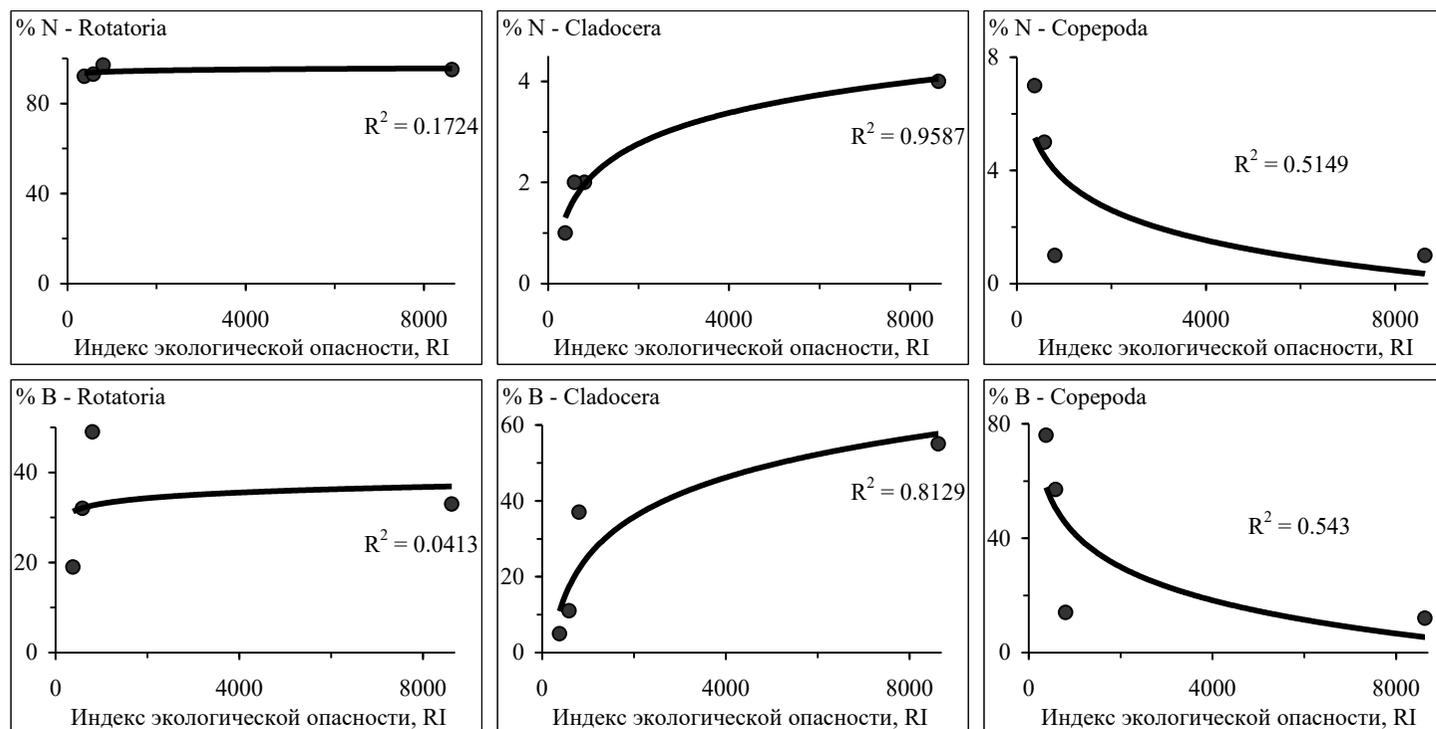


Рис. 7.15. Регрессионные зависимости индекса экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра и процентного соотношения численности (N) и биомассы (B) таксономических групп зоопланктона (Rotatoria — коловратки, Cladocera — ветвистоусые рачки, Copepoda — веслоногие рачки)

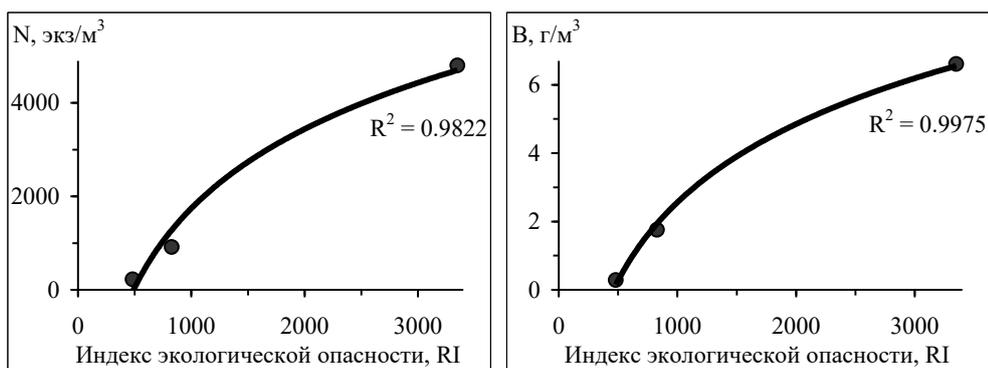


Рис. 7.16. Регрессионные зависимости индекса экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра и численности (N , экз/м³) и биомассы (B , г/м²) зообентоса

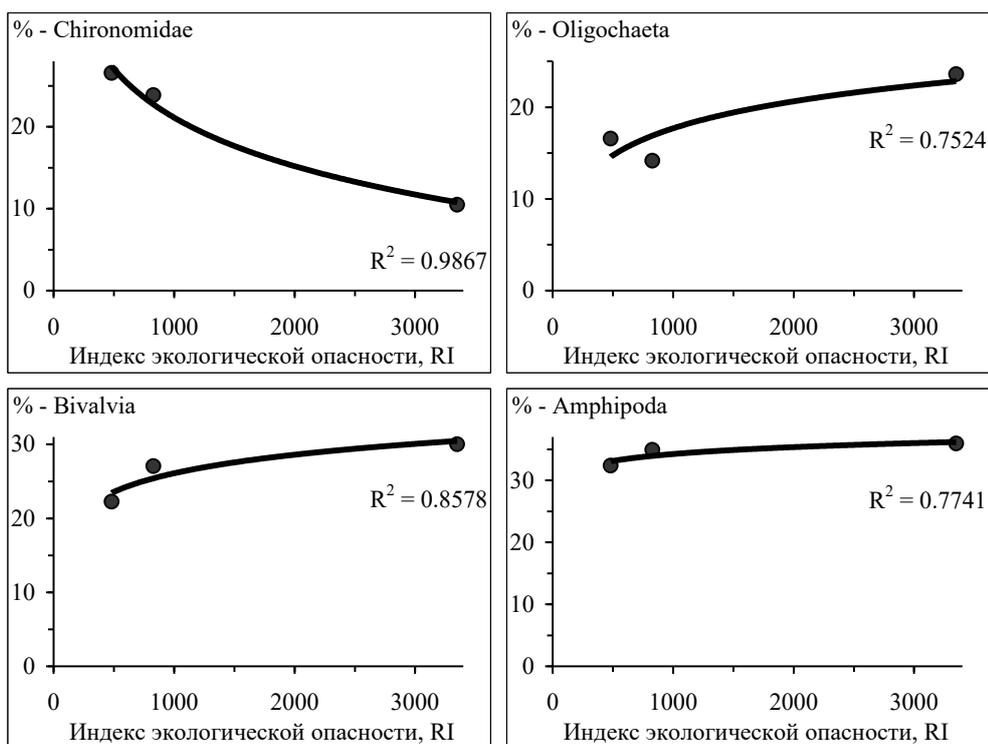


Рис. 7.17. Регрессионные зависимости индекса экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра и процентного соотношения численности таксономических групп зообентоса

Индекс экологической опасности отдельных плесов оз. Имандра коррелирует с процентным соотношением численности таксономических групп зообентоса (рис. 7.17): доля хирономид с ростом антропогенной нагрузки снижается, тогда как доля олигохет, двустворчатых моллюсков и амфипод увеличивается с ростом индекса экологической опасности.

В оз. Имандра обнаружена также корреляционная зависимость индекса экологической опасности с долей больных рыб с патологиями печени и жабр

(рис. 7.18): с увеличением антропогенной нагрузки доля патологий этих органов рыб увеличивается (Даувальтер, Терентьев, 2018; Терентьев и др., 2018).

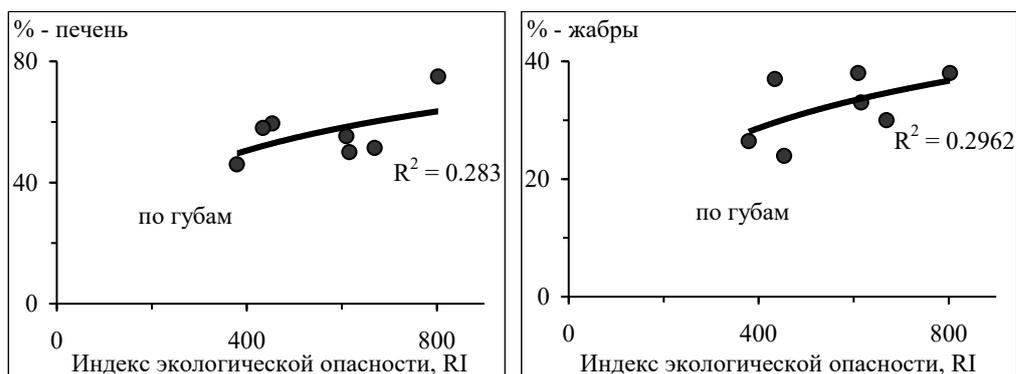


Рис. 7.18. Регрессионные зависимости индекса экологической опасности оз. Имандра и доли рыб с патологиями печени и жабр

Данный параграф, синтезируя материалы и выводы этой главы, дает сравнительную оценку экологической опасности загрязняющих веществ для экосистемы оз. Имандра. Индекс экологической опасности (RI) дает быстрые и простые количественные значения экологической опасности современной ситуации загрязнения на конкретных акваториях.

7.8. Современное минералообразование в донных отложениях озера Имандра

Минералогические исследования ДО континентальных водоемов в последние годы стали особенно актуальны по нескольким причинам. Во-первых, минералы-представители различных классов и групп рассматриваются как наиболее долгоживущие депоненты информации о всевозможных изменениях в обстановке осадконакопления (климатических, литологических, экологических и проч.), при этом данная информация фиксируется на различных уровнях структуры, состава и свойств конкретных минералов. Во-вторых, сведения о минеральном составе донных отложений и структурно-химических особенностях конкретного минерала или группы минералов позволяют: 1) оценить соотношение природной и техногенной составляющих в разные периоды их формирования; 2) выявить вклад каждой из этих составляющих в эволюцию и взаимосвязи органического и неорганического веществ; 3) определить степень антропогенной нагрузки на реальный водоем (Никандров, 2014).

Информация о минеральном составе и минералообразовании ДО важна с точки зрения теории и практики, так как позволяет не только реконструировать климат и природную среду прошлого, но и прогнозировать будущие тенденции их изменения. Также эта информация дает представление об источниках вещества, характере его мобилизации, миграции и фиксации в экзогенных условиях. Кроме того, она способствует выработке практических рекомендаций по сохранению и возможному воспроизводству минерального разнообразия субквальных озерных ландшафтов.

В зависимости от источника минералы в ДО подразделяются на три класса:

1) аллогенные минералы — привносятся в озеро с территории водосбора, они характеризуют территорию водосбора, в том числе и антропогенную деятельность на ней;

2) эндогенные минералы — результат химических процессов в водной толще водоемов, приводящих к флокуляции и осаждению этих минералов на поверхности ДО;

3) аутигенные минералы — формируются внутри ДО в специфических физических, химических и биологических условиях (Даувальтер, 2012).

Особое внимание при минералогических исследованиях ДО водоемов уделяется аутигенным минералам, так как именно они характеризуют специфические условия и процессы, происходящие в ДО, и присущие данному водоему. После кислорода, кремния и алюминия железо является наиболее распространенным элементом в земной коре, и, следовательно, оно должно являться одним из наиболее распространенных элементов в ДО.

В донных отложениях оз. Имандра главным образом исследовалось аутигенное минералообразование железа, так как уже было ранее сказано, что одними из ведущих контролирующих факторов накопления элементов, в том числе и диагенетической трансформации железа, являются физико-химические условия в ДО — окислительно-восстановительная обстановка (редокс-потенциал E_h) и кислотно-щелочные условия (водородный показатель pH). В донных отложениях в окислительной обстановке при значениях pH от слабокислотных до щелочных, данный элемент существует в форме гидроксидов железа трехвалентного (Fe^{3+}), совместно с марганцем формирующих железомарганцевые образования — конкреции, каймы обрастания и корки (рис. 7.19).

Когда значение E_h снижается до 0,2V при нейтральных значениях pH , трехвалентное железо восстанавливается до двухвалентного и переходит в растворенное состояние в виде ионной формы Fe^{2+} , которая аккумулируется в поровой воде ДО или транспортируется обратно в водную толщу. При дальнейшем снижении значений E_h двухвалентное железо может осаждаться в виде сульфидов (главным образом пирита FeS_2), которые являются плохо растворимыми соединениями. При окислении восстановленных ДО ионы двухвалентного железа трансформируются в трехвалентное и снова оседают на дно, как правило, в виде гидроксидов. Стабильность гидроксидов железа трехвалентного поддерживается высокими значениями pH .

Эти редокс-контролируемые трансформации зависят от нескольких факторов, из которых продуктивность придонных слоев воды водоема является наиболее важным: чем выше продуктивность, тем больше нагрузка органических, поглощающих кислород материалов на поверхность донных отложений. Разложение органического материала может привести к образованию восстановительной обстановки в донных отложениях, особенно, если они контактируют с застойной придонной водой. Следовательно, восстановленные ДО с формами двухвалентного железа являются распространенными ниже термоклина в гипер- и эвтрофных водоемах в регионах с умеренным климатом. Окислительные процессы у дна водоема и связанная с ними трансформация фракций железа может иметь место, когда ДО контактируют с придонной водой с высоким содержанием растворенного кислорода, то есть когда водная толща гомотермальна.

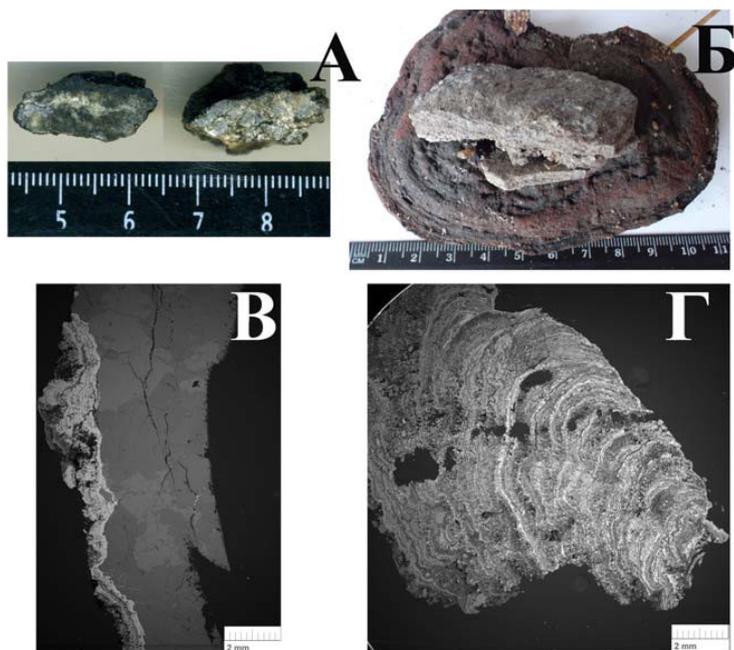


Рис. 7.19. Каймы обрастания (А) и корки (Б) ДО оз. Большое Миассово, Южный Урал; В и Г — изображение тех же образцов в отраженных электронах (Никандров, 2014)

Очевидно, что существование различных дискретных форм минералов железа в донных отложениях водоемов является результатом протекания сложных взаимодействующих между собой процессов. Растворение, осаждение и трансформация происходят в зависимости от условий окружающей обстановки, которая изменяется несколько раз в течение короткого периода годового цикла. Реакции, протекание которых зависит от окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных процессов, являются существенными не только для мобильности и распределения железа в ДО, этот режим влияет на геохимию фосфора и многих микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов, в донных отложениях водоемов и, следовательно, является крайне важным для обмена фосфора и металлов через границу раздела вода — донные отложения.

Формирование железомарганцевых образований

Водоемы, в ДО которых отмечается наличие железомарганцевых образований, издавна привлекали внимание исследователей, главным образом как источники железной руды для горной промышленности. Такие рудные образования сравнительно часто встречаются в различных районах Мирового океана (Страхов, 1968), в континентальных пресных водоемах — оз. Байкал (Лейбович-Гранина, 1986; Геохимические..., 1992; Батулин, 2009) и оз. Онежское (Васильева, 1990), в малых озерах Северо-Запада России (Страхов, 1954; Семенович, 1958; Федорова, 1964б; Яковлева, 1974) и Южного Урала (О находках..., 2012; Масленникова и др., 2014; Никандров, 2014), Северной Америки (Edgington, Callender, 1970; Harris, Group, 1970; Asikainen, Werle, 2007), Африки (Williams, Owen, 1992). Специальные исследования, проведенные Институтом географии АН СССР (Федорова, 1964а), показали, что железомарганцевое рудообразование

в ДО озер широко распространено в пределах Балтийского кристаллического щита как на территории Республики Карелии, так и на Кольском полуострове. Стоит отметить, что в последнем случае оно отмечается преимущественно в глубоководных озерах, причем наиболее мощные рудные образования приурочены к верхним слоям илов глубоководных участков. В прошлом озерные ЖМО, находящиеся на Северо-Западе России и в Скандинавских странах, использовались для производства железа (так называемые озерные и болотные руды).

Рассматривая лимнологические условия озер Кольского полуострова, в которых встречаются железомарганцевые образования, Е. М. Федорова (1964б) отмечает следующие признаки таких водоемов: а) значения рН воды близки к нейтральным; б) высокое содержание растворенного кислорода по всей водной толще до дна; в) связанный с предыдущим условием высокий окислительно-восстановительный потенциал воды; г) низкая окисляемость воды; д) небольшое содержание железа в воде. Большинство исследователей связывает накопление повышенных концентраций железа и марганца в ДО водоемов с процессами раннего диагенеза (Страхов, 1954; Федорова, 1964а; Волков, Севастьянов, 1968). При этом некоторые виды и фазы железомарганцевого рудообразования могут быть обусловлены физико-химическими процессами, тогда как другие — деятельностью микроорганизмов, таких, например, как железобактерии (Кузнецов, 1952; Страхов, 1954; Федорова, 1964а). Скорее всего, эти две группы процессов протекают параллельно в неразрывной связи друг с другом.

Первые находки ЖМО в донных отложениях оз. Имандра были описаны в одной из наиболее ранних работ, посвященных изучению озера (Рихтер, 1934). В результате исследований, проведенных в конце 1920-х гг. (то есть в период, который предшествовал началу развития горнорудной и металлургической промышленности на берегах озера — 1930-е гг.), было отмечено, что «довольно часто в илу встречаются окислы железа в виде мелких мажущихся вкраплений или в виде тонкой железистой пленки, или, наконец, плотной темно-бурой корочки, состоящей из более крупных твердых зерен». Следовательно, современные находки ЖМО в ДО загрязненных и условно чистых участков озера, как и подобные находки в доиндустриальный период освоения водосборной территории, подтверждают их определяющую роль в образовании естественных природных процессов раннего диагенеза, а не антропогенных факторов, связанных с загрязнением озера промышленными стоками. Хотя последние тоже вносят свои изменения в процесс формирования железомарганцевых образований, например, вследствие развития процессов эвтрофирования и закисления, влекущих за собой дефицит кислорода и увеличение концентрации ионов водорода, а следовательно, и формирование восстановительной обстановки и кислотных условий в придонных слоях воды и верхней части ДО, что препятствует образованию ЖМО.

В результате проведенных исследований на оз. Имандра (Ильяшук, 2001; Даувальтер, Ильяшук, 2007) ЖМО выявлены как в интенсивно загрязняемом промышленными стоками (с высоким содержанием флотореагентов тяжелых и металлов) комбината «Североникель» районе северного плеса — Большая Имандра (средняя часть Монче-губы) на глубине 14,5 м, так и на условно чистом участке западного плеса — Бабинская Имандра (средняя часть губы Пасма) на глубине 13,5 м. Найденные конкреции представляют собой железомарганцевую рудную корку коричневого цвета толщиной до 10 мм, которая была локализована

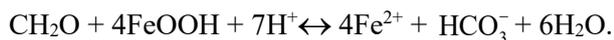
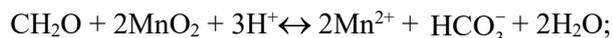
в 0–4 мм от поверхности ДО (серый или черный ил). Концентрации железа и марганца в них существенно превышали кларковые [4,65 % для Fe и 0,1 % для Mn, Виноградов, 1962]: Fe ($n = 3$) — $304,5 \pm 37,1$ мг/г (30,45 %), Mn ($n = 3$) — $81,7 \pm 7,64$ мг/г (8,17 %). Полученные результаты свидетельствуют также о том, что интенсивно протекающие естественные природные процессы раннего диагенеза, приводящие к образованию ЖМО, как и антропогенные (например, техногенное загрязнение), способны обуславливать крайне бедный видовой состав и низкую плотность беспозвоночных в сообществах зообентоса, то есть ЖМО ограничивают развитие донных организмов вследствие образования твердой, непроницаемой для проникновения гидробионтов преграды (Ильяшук, 2001).

Поведение железа и марганца в водной толще и донных отложениях заслуживает особого внимания, потому что эти металлы играют центральную роль в геохимических циклах других элементов (Davison, 1985). Высокая степень окисления свойственна нерастворимым формам обоих металлов, в то время как меньшая степень характерна для растворимых и относительно более свободных от комплексообразования. Например, растворимость гидроокиси двухвалентного железа на четыре порядка выше растворимости гидроокиси трехвалентного, растворимость этих гидроокисей зависит также от концентрации ионов водорода, то есть растворимость гидроокиси трехвалентного железа при уменьшении pH с 8 до 6 увеличивается также на 4 порядка (Беус и др., 1976). Поэтому в условиях эвтрофирования и закисления не происходит образования ЖМО в донных образованиях озер, а концентрации марганца в озерных осадках минимальны и снижаются до нескольких микрограммов на 1 г, что сравнимо с содержанием никеля и меди, а содержание железа более чем на порядок меньше кларка (Dauvalter, 1997). Следовательно, ионы марганца и железа являются мобильными компонентами и очертания профилей их концентраций указывают на характер переноса этих элементов.

Рассмотрению распределения железа и марганца по профилю водной толщи и ДО посвящено немало работ (Calvert, Price, 1972; Norton, 1974; Elderfield, 1976; Тяжелые..., 1996), включая математическое моделирование поведения этих элементов (Michard, 1971; Burdige, Gieskes, 1983; Davison, 1985; Boudreau, 1999). Вместе с тем, за некоторым исключением (Robbins, Callender, 1975; Davison, 1981; Davison, Woof, 1984), эти работы посвящены в основном морским системам, поэтому данные о характере распределения этих элементов в водной толще озер ограничены (Davison, 1982).

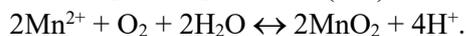
В монографии (Моисеенко и др., 1997) подробно рассмотрено поведение марганца и железа в восстановительных и окислительных условиях в водной толще и ДО оз. Имандра. В водоеме выявлена стратификация насыщения вод O_2 в зимний и весенний период в результате окисления накопленного на дне органического материала. Для Субарктики характерно наличие небольших лесных и заболоченных озер с высоким содержанием гумуса. Поэтому дефицит O_2 у дна может развиваться не только в озерах под влиянием антропогенного загрязнения, но и в природных заболоченных водоемах. Установлено, что редокс-цикл железа и марганца в озерах является основным механизмом окисления-восстановления этих элементов Fe^{3+} - Fe^{2+} и Mn^{4+} - Mn^{2+} . Редокс-системы марганца и железа хорошо известны в научной литературе (Davison, 1985).

1. Микроорганизмы в бескислородных условиях являются катализаторами восстановления марганца и железа:



Восстановление окислов Mn^{4+} до растворенного иона Mn^{2+} происходит при более высоком редокс-потенциале (то есть при более высоких концентрациях растворенного O_2), чем восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} .

2. Окисление железа и марганца в кислородных условиях может быть описано следующими реакциями:



Окисление растворенного Fe^{2+} до взвешенных окислов Fe^{3+} происходит быстрее, чем окисление Mn^{2+} до окислов Mn^{4+} . При значениях pH, характерных для поверхностных вод, окисление марганца протекает довольно медленно. Поэтому при попадании в водоемы Fe^{2+} и Mn^{2+} сначала идет окисление и осаждение железа и лишь потом марганца, в то же время восстановление его окисленных форм в донных отложениях водоемов протекает легче, чем восстановление соединений железа (Никаноров, 2001).

На границе между кислородными и бескислородными условиями (то есть окислительной и восстановительной обстановки) происходит изменение степени окисления железа и марганца. Круговорот этих элементов можно описать следующей схемой (Davison, 1993). Оксиды Fe (III) и Mn (IV), сформировавшиеся в насыщенных кислородом условиях, механически осаждаются в водной среде. Достигая бескислородного слоя воды и ДО, Fe (III) и Mn (IV), находящиеся в составе оксидов, начинают восстанавливаться, и оксиды Fe (III) и Mn (IV) постепенно растворяются. Растворенные формы Fe (II) и Mn (II) диффундируют вверх по сформированному градиенту железа и марганца в водной толще или поровых водах ДО. В обогащенной кислородом среде Fe (II) и Mn (II) окисляются и осаждаются в виде Fe (III) и Mn (IV). Последние механически оседают, достигая бескислородных условий, и цикл повторяется.

Увеличение концентраций железа и марганца в поверхностных слоях донных отложений характерно как для больших водоемов: Имандра (Антропогенные модификации..., 2002) и Инари (Даувальтер, 1998) — крупнейшие озера Мурманской области и Финляндской Лапландии, так и для малых: оз. Чуна водосбора оз. Имандра (Антропогенные изменения..., 2007; Оценка баланса..., 2009), оз. Кутсаьярви, северная Швеция (Фракционирование..., 2005). Максимальные содержания марганца (превышающие кларковые и фоновые в 10–50 раз) в толще ДО вышеназванных озер приурочены к поверхностному сантиметровому слою. Вероятно, это вызвано тем, что смена окислительных на восстановительные условия происходит именно в этом верхнем слое и, как сказано выше, восстановление окислов Mn^{4+} до растворенного иона Mn^{2+} происходит при более высоком редокс-потенциале (то есть при более высоких концентрациях растворенного O_2), чем восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} . Следовательно, максимальные содержания железа (превышающие кларковые и фоновые до 10 раз) в ДО могут отмечаться и на большей глубине, то есть в условиях более низкого значения Eh (при низких концентрациях растворенного O_2). Поэтому можно сделать вывод: чем лучше придонные слои воды и поверхностные слои ДО снабжаются кислородом, тем на большей глубине ДО происходит отложение труднорастворимых окислов Fe^{3+}

и образование ЖМО. В оз. Кутсаьярви в конце зимы (в мае 2003 г.) подо льдом дефицита кислорода не обнаружено, граница между окислительными и восстановительными условиями находится ниже поверхности раздела вода — донные отложения (Фракционирование..., 2005), что проявилось в резком увеличении содержания Fe_2O_3 (до 70 %) на глубине 11 см. В то же время увеличение концентраций марганца началось с глубины 12 см, а максимальное содержание (MnO — 4,2 %) обнаружено в поверхностном сантиметровом слое. Это также подтверждает предположение, что окисление растворенного Fe^{2+} до труднорастворимых окислов Fe^{3+} происходит быстрее, чем окисление Mn^{2+} до окислов Mn^{4+} . Увеличение концентраций железа в подповерхностных слоях ДО связано с процессами молекулярной диффузии растворенных закисных форм железа из нижележащих ДО, характеризующихся анаэробными условиями и обладающих восстановительным потенциалом, вверх к контакту с окисленной зоной водной толщи, где они, окисляясь, вновь теряют подвижность и обогащают поверхностный окисленный слой (Миграция и круговорот..., 1999). Кроме того, в работе (Фракционирование..., 2005) показано, что осаждение образованного в окислительной обстановке Fe^{3+} приводит к формированию оксидов, обогащенных тяжелыми изотопами, в первую очередь ^{56}Fe .

С помощью методов инфракрасной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии с рентгенофлуоресцентным анализом (Комплексное исследование..., 2009) было проведено подробное исследование состава минералов ЖМО оз. Большое Миассово (О находках..., 2012). Было установлено, что они полиминеральны и являются гидроксидно-карбонатными. Карбонатные минералы родохрозит и кутногорит отмечаются во всех ЖМО. Сидерит фиксируется только в корках, развитых на железистых субстратах. Среди гидроксидов определены гётит, лепидокрокит, ферригидрит, бузерит, бёрнессит, вернадит, тодорокит, голландит, литиофорит. Наиболее распространены марганцевые фазы, набор которых в каждом конкретном случае различен. Иногда с гидроксидами железа и сидеритом ассоциирует вивианит. Сведения о минеральном составе озерных ЖМО достаточно скудны и нередко ограничиваются упоминаниями гётита, вернадита, манганита или рентгеноаморфных гидроксидов марганца и железа (Корнилов, Веретенникова, 1998; Sommers et al., 2002). Чуть ли не единственным исключением являются ЖМО из оз. Байкал: в мелководных байкальских конкрециях определены пирит, магнетит, вернадит, асболан, тодорокит, апатит и гипс, в глубоководных — гетит, гидрогетит, романешит, вернадит, бернессит, бузерит (Батурин и др., 2009).

Больше внимания уделяется химическому составу озерных ЖМО (Edgington, Callender, 1970; Harris, Troup, 1970; Яковлева, Сергеева, 1978; Williams, Owen, 1992; Sommers et al., 2002; Даувальтер, Ильяшук, 2007; Asikainen, Werle, 2007; Батурин и др., 2009) (табл. 7.25). Содержания главных видообразующих элементов — марганца и железа изменяются в широких пределах не только в разных образцах, но и в различных частях одного и того же образца, однако средние величины Mn/Fe являются характеристическими для водоема в целом (Harris, Troup, 1970). По сравнению с другими объектами ЖМО из оз. Имандра отличаются пониженными содержаниями марганца, тогда как из оз. Большое Миассово — повышенными, а характеристический показатель Mn/Fe для ЖМО из оз. Имандра минимален среди всех представленных результатов исследований химического состава ЖМО пресноводных озер (табл. 7.25). По содержанию железа и марганца и соотношению Mn/Fe

железомарганцевые образования озер Имандра и Коннектикут Лэйк, США (Asikainen, Werle, 2007) подобны. Вероятно, водосборы озер Имандра и Большое Миассово резко отличаются по геохимическому составу слагающих пород и условиям осадконакопления. Кроме того, для «миассовских» ЖМО характерно высокое содержание бария, которое составляет в среднем 3,45 %, иногда достигая и 9 %. Помимо бария, высокими содержаниями отличаются также титан и ванадий, причем все три элемента обнаруживают прямую корреляцию между собой и обратную по отношению к железу. Содержание титана изменяется от 2,5 до 4,7 %, ванадия — от 0,45 до 1,06 %, в то время как в мелководных байкальских ЖМО первые не превышают десятых, вторые — сотых долей процента (Батурин и др., 2009). В глубоководных железомарганцевых образованиях из Байкала концентрации этих элементов несколько выше, но все равно они не достигают уровня миассовских. Аналогичное явление (высокие содержания бария, ванадия и титана при прямой корреляции между ними) характерно также для глубоководных конкреций из оз. Малави, что объясняется дополнительным привнесением вещества из гидротермальных источников (Williams, Owen, 1992).

В табл. 7.25 приведены также результаты химического анализа ЖМО в ДО оз. Охтозера (отобраны в октябре 1999 г.), находящегося на водосборе оз. Имандра, поэтому их состав подобен железомарганцевым образованиям в донных отложениях оз. Имандра, включая отношение Mn/Fe.

Таким образом, формирование железомарганцевых образований в донных отложениях оз. Имандра происходит при наличии следующих условий:

- 1) близкие к нейтральным значения рН воды и отсутствие проявления процессов закисления озер;
- 2) высокое содержание растворенного кислорода по всей водной толще до дна в отсутствие процессов эвтрофирования озер;
- 3) достаточная глубина озера.

Максимальные концентрации марганца в этих озерах отмечаются, как правило, в поверхностном 1-см слое ДО, а наибольшие содержания железа приурочены к более глубоким слоям, находящихся на границе смены окислительных условий на восстановительные. Это обусловлено геохимическими особенностями данных металлов: окисление растворенного Fe^{2+} до труднорастворимых окислов Fe^{3+} происходит быстрее (при более низких величинах окислительно-восстановительного потенциала или при более низких концентрациях растворенного O_2), чем окисление Mn^{2+} до окислов Mn^{4+} . ЖМО из оз. Имандра имеют пониженные содержания марганца и повышенные — железа, а характеристический показатель Mn/Fe для них минимален по сравнению с другими пресноводными озерами.

Образование фрамбоидального пирита

Как было сказано выше, в восстановительной обстановке при снижении значений Eh двухвалентное железо может осаждаться в виде сульфидов (главным образом пирита FeS_2), которые являются плохо растворимыми соединениями. Особенности миграции и круговорота серы на границе вода — дно в оз. Имандра подробно описаны в статье (Миграция и круговорот..., 1999). В результате исследований было установлено, что увеличение содержания сульфатов в воде, повышенная седиментация отмирающих организмов (сестона), диффузионные потоки сульфатов к границе окислина и восстановление сульфатов до сульфидов в анаэробной толще ДО приводит к повышенной аккумуляции серы и образованию сульфидов железа, в первую очередь пирита.

Средние содержания металлов в ЖМО пресноводных озер

Металл	Места нахождения ЖМО										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Макрокомпоненты, %											
Fe	30,45	21,54	3,21	12,83	15,62	31,58	8,49	16,60	16,70	40,20	32,50
Mn	8,17	6,46	18,94	12,40	11,18	9,91	7,66	33,00	26,60	15,70	17,00
Mn/Fe	0,27	0,30	5,90	0,97	0,72	0,31	0,90	1,99	1,59	0,39	0,52
Микрокомпоненты, мкг/г											
Ti	–	–	35513	1149	3300	–	–	–	–	–	–
Sr	223	74	199	360	573	–	100	–	–	–	–
Ba	–	–	34500	1330	8167	1972	5408	–	–	–	–
Cu	13	18	31	16	497	–	8.20	14	7	10	
Ni	23	156	–	97	1680	111	–	296	112	95	40
Co	23	155	–	37	277	–	52.3	196	221	135	230
V	–	–	7610	66	420	–	–	–	–	–	–
Pb	77	14	–	53	47	31	–	26	27	24	27
Zn	32	589	44	521	342	561	140.3	1665	475	250	50
Cr	28	5	–	46	–	114	–	–	–	–	–

Примечания: 1 — оз. Имандра; 2 — оз. Охтозеро; 3 — Большое Миассово (О находках..., 2012); 4, 5 — Байкал: 4 — мелководные ЖМО, 5 — глубоководные ЖМО (Батулин и др., 2009); 6 — Коннектикут Лэйк, США (Asikainen, Werle, 2007); 7 — Мичиган, США (Edgington, Callender, 1970); 8–10 — озера Новой Шотландии, Канада: 8 — Гранд Лэйк, 9 — Шип Харбор Лэйк, 10 — Моек Лэйк соответственно; 11 — озера Швеции (Harris, Group, 1970).

В современных ДО Монче-губы оз. Имандра проводилось изучение минерального состава слоя осадка мощностью 21 см в специальных полированных препаратах, изготовленных из высушенного ила (Нерадовский и др., 2009). Морфология и состав частиц исследовались на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450. Пробы ДО характеризуются глинисто-алевритовым составом частиц; наиболее крупные — 0,025–0,05 мм, неокатанные, составляют около 20 %. Среди илстых частиц установлено присутствие образований фрамбоидального пирита. Нижний слой ила не содержит включений пирита, его выделения встречаются с глубины 10 см, где отмечается восстановительная среда. Наиболее насыщен пиритом слой осадка от 11 до 14 см, здесь его концентрация достигает 1–3 %. В вышележащей части разреза пирит встречается в единичных зернах. Совместно с ним в осадке присутствуют фрагменты растительной и животной органики, частицы графита, ильменита, рутила, а также частицы пыли сульфидного и силикатного состава, относящиеся к выбросам металлургического комбината.

В истории генезиса фрамбоидов пирита выделяется три стадии (рис. 7.20): 1) зарождение индивидов пирита (индивидуальная), 2) наполнение сфероидов (сфероидальная) и 3) кристаллизация глобул (глобулярная).



Рис. 7.20. Стадии образования агрегатов пирита: *a* — индивиды; *б* — сфероид; *в* — глобула (Нерадовский и др., 2009)

В первую стадию происходит образование зародышей пирита. Они появляются в виде октаэдрических кристаллов различных размеров (см. рис. 7.20, *a*). Зарождение самого пирита происходило, вероятно, пятикратно, поскольку было обнаружено пять независимых друг от друга групп кристаллов разного

размера (табл. 7.26). Группы одноразмерных кристаллов пирита хаотически рассеяны в обогащенном S-слое осадков (рис. 7.21). После зарождения кристаллы пирита дальше не растут, а кооперируются в агрегаты, наиболее распространенной формой которых является сфероидальная.

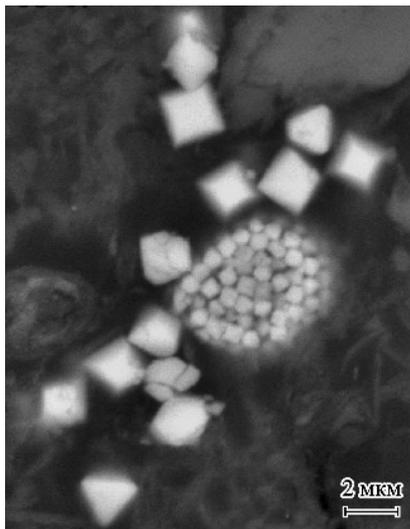


Рис. 7.21. Группы зародышей пирита разных размеров и разных зароджений. Ранняя группа кристаллов имеет меньшие размеры и уже скооперировалась в плотно упакованный агрегат округлой формы (Нерадовский и др., 2009)

Зародышей, образовавшихся в разное время, отличаются изначально разные размеры, при этом независимо от размеров они имеют одинаковую октаэдрическую форму. Зародыши кристаллов пирита разного времени формирования могут находиться в одном месте, но сфероиды образуют только индивиды одинакового размера, согласно закону постоянства размеров частиц фрамбоидального пирита (Геологический словарь, 1967; Скрипченко, 1969). Вместе с тем нельзя сказать, в какой последовательности выделялись кристаллики разных размеров.

Во вторую стадию зарождаются сфероиды кристаллов пирита (рис. 7.20, б). Объединение индивидов пирита в сфероиды осуществляется неодновременно, то есть сначала происходит сближение рассеянных кристаллов, они образуют более плотные хаотические группы расплывчатых форм. В этих группах отдельные части постепенно организуются в округлые агрегаты (рис. 7.22). Обычно в области округления кристаллы

пирита приобретают плотную упаковку, но иногда она возникает и в группе зерен, не имеющих округлости. В эти агрегаты пирита могут добавляться новые частицы, что наращивает агрегат изнутри — через «оболочку» или снаружи — на «оболочку». По-видимому, в какой-то момент «рождения» образуется более плотная связь между частицами по внешней стороне сфероида, он начинает вести себя как более крупная частица, с новыми границами. Если же граница не «закрыта», то внутри этой частицы могут поступать новые частицы, если «закрыта», то новые частицы наращивают агрегат снаружи (рис. 7.23).

Таблица 7.26

Размеры индивидов, сфероидов и глобул, мкм

Группа кристаллов	Индивиды	Сфероиды		Глобулы
		индивиды	агрегаты	
1	0,25	Нет	Нет	Нет
2	0,5	0,5–0,6	6–7	Нет
3	1,0	1,0	10–15	10–16
4	1,5	1,5	20–21	Нет
5	Нет	2,0	24–26	Нет

Следовательно, зарождение пирита происходит в виде кристаллов октаэдрической формы, а образование агрегатов — в виде сфероидов. Сфероиды растут путем миграции элементарных частиц к месту максимальной концентрации.

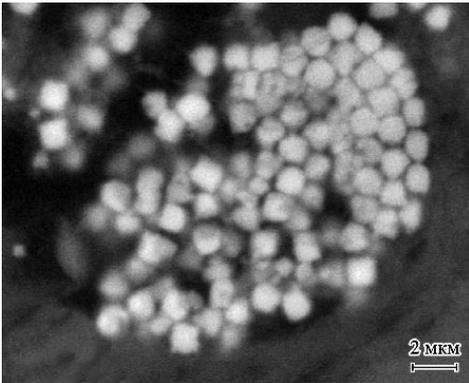


Рис. 7.22. Начальная форма образования сфероидов: с одной стороны образовалась кольцевая плотная упаковка кристаллов пирита, к которой «стекаются» другие кристаллы (Нерадовский и др., 2009)

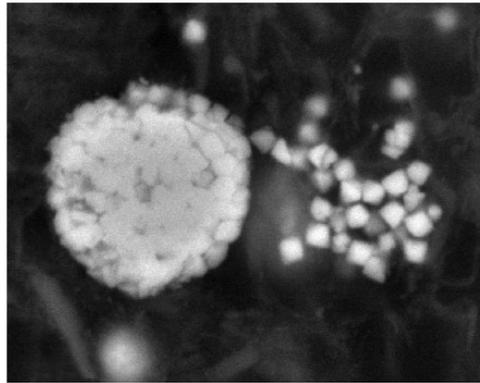


Рис. 7.23. Нарастание индивидов пирита на оболочку фрамбоида путем перемещения из группы зародышей (Нерадовский и др., 2009)

Внутреннее устройство сфероидов определяется степенью организации (уплотнения) индивидов пирита (рис. 7.24). В период сфероидального развития фрамбоидов они стремятся приобрести плотную упаковку сотовой структуры, но это не всегда достигается. Подсчеты показали, что количество кристаллов, размером от 1 до 2 мкм, обнажающихся в срезах разных сфероидов, варьирует от 80 до 110, что подтверждает различную плотность их укладки. Установлено, что размеры индивидов в сфероидах в основном такие же, как и у свободных индивидов, но отсутствуют самые мелкие и присутствуют более крупные. Наблюдается также связь размера элементарных частиц и размера сфероида: с увеличением кристаллов от 0,5 до 2,0 мкм размер сфероидов увеличивается от 6 до 26 мкм (см. табл. 7.26).

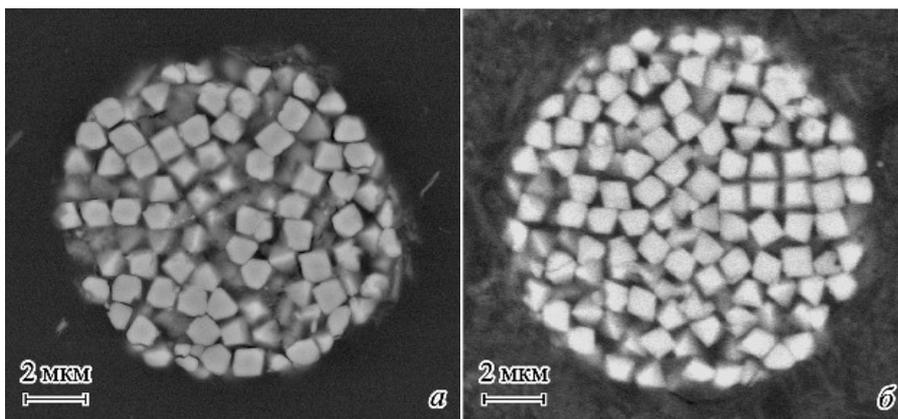


Рис. 7.24. Сфероиды с различной плотностью кристаллов пирита: *a* — видны значительные пустоты между кристаллами; *б* — видны участки паркетной структуры (Нерадовский и др., 2009)

На третьей стадии сфероиды преобразуются в глобулы (см. рис. 7.20, *в*). Уплотнение упаковки кристаллов пирита в сфероиде приводит к перекристаллизации

пирита, слиянию кристаллов в единый шарообразный кристалл — глобулу (рис. 7.25) и уменьшению размеров сфероидов. Установлено, что размеры глобул не превышают 10–16 мкм (табл. 7.26), а количество глобул значительно меньше, чем сфероидов. В связи с этим можно полагать, что образование глобул находится в начальной стадии, так как осадки молодые по возрасту.

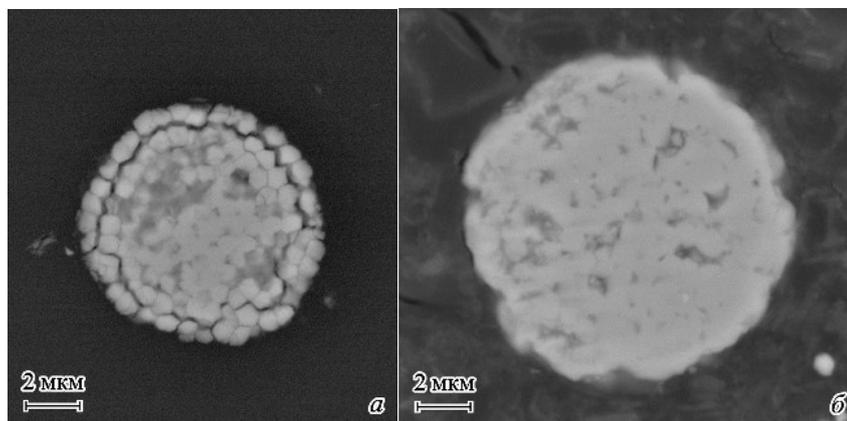


Рис. 7.25. Глобулы пирита с разной степенью срастания кристаллов:
a — кристаллы плотно упакованы, но еще видна сотовая структура и оболочка наросших позднее кристаллов; *б* — большая часть кристаллов слилась в единый кристалл (глобулу) (Нерадовский и др., 2009)

Сделана попытка установить, из каких сфероидов образованы глобулы, но, поскольку размеры индивидов в глобулах определить невозможно, их размер рассчитали теоретически, исходя из той предпосылки, что глобулы образованы из сфероидов, в которых прошел процесс упорядочения расположения кристаллов пирита из хаотического в плотнейшее. В связи с изменением плотности укладки изменился и размер сфероида. Разница изменения объема при переходе сфероида в глобулу составляет около 35 %, этому соответствуют диаметры сфероида глобулы — 20,5 и 13 мкм. Таким образом, можно полагать, что исходными сфероидами для существующих глобул являлись сфероиды с диаметром 20–21 мкм и размерами индивидов пирита 1,5 мкм.

Химический состав пирита оценивался с помощью энергодисперсионного спектрометра Roentec, установленного на сканирующем микроскопе LE0-1450. Результаты были приведены к 100 %. Исследования показали, что пирит имеет близкий к стехиометрическому химический состав и не содержит примесей (табл. 7.27), хотя рядом с ним в осадке сосуществуют частицы Fe-Ni-Co-Cu-S-сплавов. Незначительное различие содержаний элементов в пирите разных стадий развития объясняется постепенным уплотнением кристаллов и уменьшением погрешности анализа. Фактически содержание серы и железа везде одинаково, что подтверждает генетическую связь зародышей со сфероидами и глобулами.

Таким образом, образование фрамбоидального пирита в современных илах оз. Имандра происходит в несколько стадий кристаллизации от зародышей через сфероиды до глобул. Как и во многих других случаях, описанных в литературе (Минералы, 1960; Кизильштейн, 1969, 2007; Скрипченко, 1969; Геологический словарь, 1973; Байдалинов, 2007; Масленникова и др., 2014),

наблюдается ассоциация фрамбоидального пирита с органическими остатками и углеродом, а наиболее развитой формой является сфероидальная.

Таблица 7.27

Химический состав пирита разных стадий развития

Стадия	Зародыши			Сфероиды			Глобулы		
	S, %	Fe, %	Σ, %	S, %	Fe, %	Σ, %	S, %	Fe, %	Σ, %
1	50,45	49,55	100	53,34	46,66	100	52,94	47,06	100
2	49,77	50,23	100	51,86	48,14	100	52,79	47,21	100
3	–	–	–	53,24	46,76	100	52,49	47,51	100
4	–	–	–	51,63	48,37	100	53,84	46,16	100
5	50,1	49,89	100	52,52	47,48	100	53,02	46,98	100

Впервые установлены зародыши пирита, являющиеся «кирпичиками», из которых строятся фрамбоиды, и показано, что фрамбоиды формируются не сразу в замкнутом пространстве, как это представлено в некоторых вышеупомянутых работах, а путем самоорганизации микрокристаллов в сфероидальные агрегаты.

Глобулярная форма фрамбоидов пирита является наиболее совершенной и конечной для современных донных отложений Монче-губы оз. Имандра. Слияние элементарных частиц пирита в шарообразные глобулы свидетельствует о приобретении максимальной устойчивости на новом размерном уровне.

В ДО оз. Имандра, кроме железомарганцевых образований и пирита, обнаружены также другие минералы, которые имеют природное (минералы, выносимые притоками озера из коренных горных пород) и техногенное происхождение (связано с горно-металлургическим производством) (Слуковский, Даувальтер, 2017, 2018, 2019). Изучение образцов проб донных отложений осуществлялось при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGAИЛSH с энергодисперсионным микроанализатором INCAEnergy 350 на базе аналитической лаборатории Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск).

Анализ нескольких образцов ДО Зашеечной губы оз. Имандра с высоким содержанием железа (до 32 %) (а в ряде случаев и фосфора) установил, что в данных осадках железо в основном связано с минералом магнетитом, вернее, его разновидностью Cr-магнетитом (рис. 7.26), в котором содержание хрома колеблется примерно от 5 до 10 %. Источниками сноса этих минералов могут быть породы Мончегорского плутона и Оленегорские железистые кварциты. В отдельных зернах обнаружены примеси никеля и меди, что может быть связано с антропогенным фактором формирования химического состава ДО оз. Имандра, в особенности если учитывать, что именно эти тяжелые металлы — основные микроэлементы-загрязнители ДО озер Мурманской области (Chemical..., 2011; Даувальтер, 2012; Даувальтер и др., 2012, 2015). Кроме того, в ДО оз. Имандра изучены единичные зерна таких минералов, как касситерит, самородное серебро, барит и биотит, в которых обнаружены примеси тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, W). Скорее всего, они имеют природное происхождение.

Было проведено также изучение образцов проб ДО оз. Нюдъявр, загрязняемого стоками комбината «Североникель» Кольской ГМК (Слуковский,

Даувальтер, 2018, 2019). Этот водоем поставляет свои воды в Монче-губу оз. Имандра, поэтому минералы, обнаруженные в ДО оз. Нюдъявр, с большой вероятностью могут быть встречены и в Имандре. Пробы донных отложений оз. Нюдъявр исследованы с четырех различных слоев: 0–1, 5–6, 6–7 и 11–12 см.

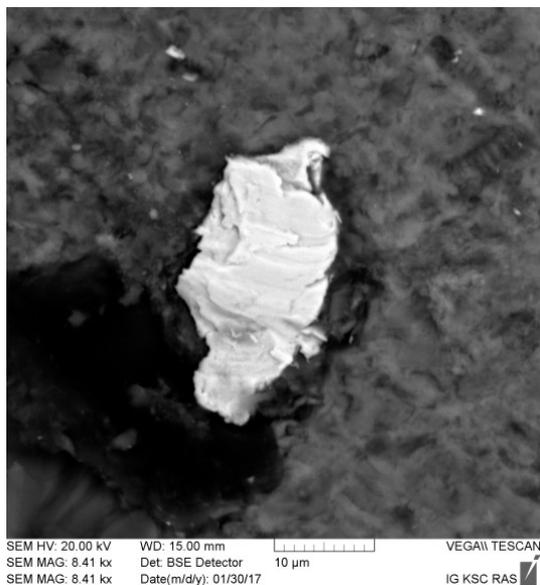


Рис. 7.26. Электронное изображение Cr-магнетита: содержание хрома — более 10 %, присутствие никеля — 0,2 % из донных отложений оз. Имандра (Зашеечная губа) (Слуковский, Даувальтер, 2017)

Среди 24 минеральных агрегатов, исследованных в ходе работ, были идентифицированы частицы округлой или неправильной формы, имеющие явное техногенное происхождение (рис. 7.27). Наибольшее количество этих частиц было обнаружено в слое 6–7 см донных отложений оз. Нюдъявр, в 7 из них установлено содержание никеля от 29 до 69 вес. %, в 5 выявлено содержание меди до 51 вес. %. Изученные агрегаты, по сравнению с исследованными частицами в других слоях ДО оз. Нюдъявр, имеют большие размеры — от 20 до 80 мкм. Очевидно, что генезис этих минеральных частиц связан с промышленной переработкой руд цветных металлов.

В слоях 0–1 и 5–6 см также обнаружены подобные частицы с содержанием в них никеля от 55 до 94 % и меди от 4 до 76 %. В самом нижнем слое (11–12 см) донных отложений таких частиц не выявлено. В состав изученных минеральных образований также входят железо, сера, хром, кобальт, кремний и кислород. Стоит также отметить, что во всех изученных образцах ДО встречаются агрегаты пирита (см. нижнее правое изображение на рис. 7.27) разных стадий (сфероида, глобулы). Установлено, что размеры сфероида и глобулы агрегатов пирита ДО оз. Нюдъявр соответствуют размерам полученных ранее агрегатов пирита в ДО оз. Имандра (Нерадовский и др., 2009). В некоторых из частиц пирита установлена примесь никеля и меди, которые, вероятно, были адсорбированы природным минеральным образованием железа. Следовательно, в исследованных ДО имеет место быть две формы нахождения главных загрязняющих тяжелых металлов:

- 1) в собственных минералах техногенного происхождения;
- 2) в природных минералах в качестве примесей.

Содержание никеля и меди во втором случае во много раз ниже первого.

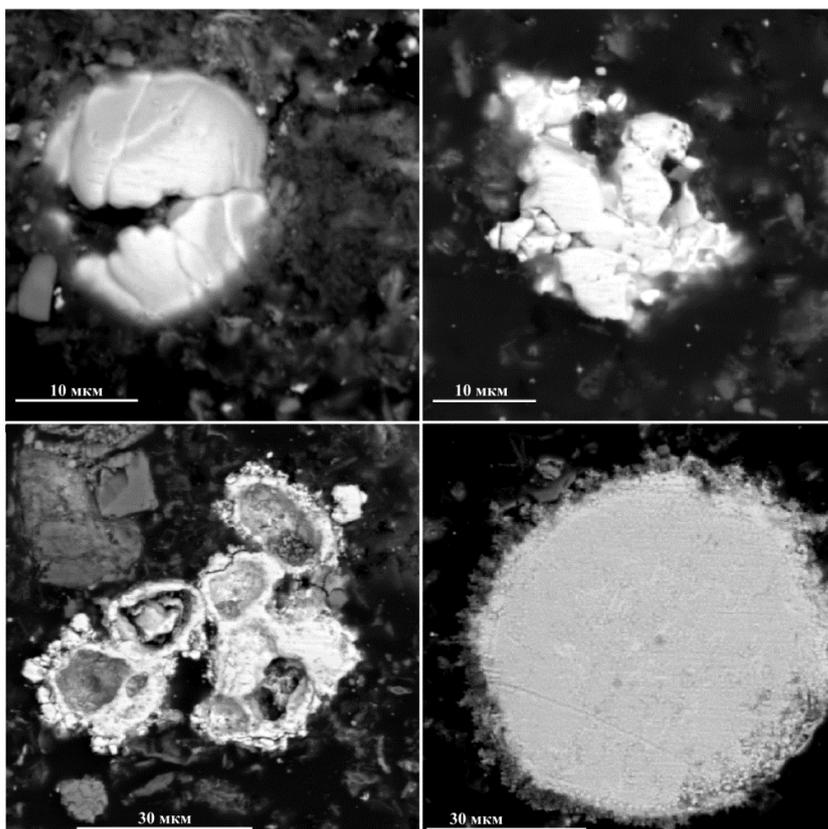


Рис. 7.27. Минеральные частицы техногенного генезиса в ДО оз. Нюдъявр (Слуковский, Даувальтер, 2018)

Литература

1. Алабышев, В. В. Находка сапропеля (гиттии) на Кольском полуострове / В. В. Алабышев // Природа. 1929. С. 910.
2. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области : в 2 частях. Ч. 2 : Озерно-речная система реки Чуна в условиях аэротехногенного загрязнения / Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, С. С. Сандимиров [и др.]. Апатиты : КНЦ РАН, 2007. 238 с.
3. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, А. А. Лукин [и др.] ; под ред. Т. И. Моисеенко. Москва : Наука, 2002. 487 с.
4. Байдалинов, А. Т. Феномен отрицательных магнитных аномалий / А. Т. Байдалинов // Геология и охрана недр. 2007. № 1 (22).
5. Баранов, И. В. Природные особенности водохранилищ Мурманской области / И. В. Баранов // Рыбы Мурманской области. Условия обитания, жизнь и промысел. Мурманск : Кн. изд-во, 1966. С. 24–32.

6. Батурин, Г. Н. О минеральном составе железомарганцевых конкреций озера Байкал / Г. Н. Батурин, В. Т. Дубинчук, Е. В. Авилова // ДАН. 2009. Т. 426, № 2. С. 207–211.
7. Беус, А. А. Геохимия окружающей среды / А. А. Беус, Л. И. Грабовская, Н. В. Тихонова. Москва : Недра, 1976. 248 с.
8. Вандыш, О. И. Зоопланктон как индикатор состояния озерных экосистем (на примере субарктического оз. Имандра) / О. И. Вандыш // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 3. С. 364–370.
9. Васильева, Е. П. Донные отложения / Е. П. Васильева // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / под редакцией З. С. Кауфмана. Ленинград : Наука, 1990. С. 147–174.
10. Виноградов, А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А. П. Виноградов // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
11. Волков, И. И. Перераспределение химических элементов в диагенезе осадков Черного моря / И. И. Волков, В. Ф. Севастьянов // Геохимия осадочных пород и руд / под редакцией Н. М. Страхова. Москва : Наука, 1968. С. 134–182.
12. Геологический словарь : в 2 частях. Т. 2. 1973. 393 с.
13. Геохимические типы железомарганцевых конкреций озера Байкал / А. А. Амиржанов, В. Д. Пампура, Л. Ф. Пискунова, Е. Б. Карabanов // ДАН. 1992. Т. 326, № 3. С. 530–534.
14. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин [и др.]. Москва : Недра, 1990. 335 с.
15. Гигант в Хибинах / А. В. Барabanов, Т. А. Калинина, А. А. Киселев, А. И. Краснобаев. Москва : Руда и металлы, 1999. 288 с.
16. Даувальтер, В. А. Аккумуляция тяжелых металлов в донных отложениях и органах и тканях сига (*Coregonus lavaretus*) озера Имандра / В. А. Даувальтер, П. М. Терентьев // Труды Ферсмановской научной сессии Геологического института КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 445–448.
17. Даувальтер, В. А. Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах Севера европейской части России / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2015а. 136 с.
18. Даувальтер, В. А. Влияние деятельности горно-металлургических предприятий на химический состав озера Имандра, Мурманская область / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Биосфера. 2015б. Т. 7, № 3. С. 295–314.
19. Даувальтер, В. А. Влажность донных отложений озера Имандра как маркер деятельности горно-перерабатывающей промышленности / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Наука и образование — 2013 : материалы междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 4–11 марта 2013 г. / Мурман. гос. тех. ун-т. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2013б. С. 891–895.
20. Даувальтер, В. А. Геоэкология донных отложений озер / В. А. Даувальтер. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
21. Даувальтер, В. А. Долговременные изменения химического состава донных отложений озера Имандра в зоне влияния стоков Кольской атомной электростанции / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 3. 2013а. № 3 (16). С. 6–35.
22. Даувальтер, В. А. Изменение концентраций никеля и меди в поверхностных слоях донных отложений оз. Имандра за последние полвека / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Вестник МГТУ. 2015в. Т. 18, № 2. С. 307–321.

23. *Даувальтер, В. А.* Геохимия редкоземельных элементов в озере Имандра, Мурманская область / В. А. Даувальтер, Т. И. Моисеенко, И. В. Родюшкин // Геохимия. 1999. № 4. С. 376–383.
24. *Даувальтер, В. А.* Геоэкология озер Мурманской области : монография : 3 частях. Ч. 3: Донные отложения водоемов / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2014. 214 с.
25. *Даувальтер, В. А.* Исследование физического и химического состава донных отложений при оценке экологического состояния водоемов / В. А. Даувальтер. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2006. 84 с.
26. *Даувальтер, В. А.* Оценка токсичности металлов, накопленных в донных отложениях озер / В. А. Даувальтер // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 4. С. 469–476.
27. *Даувальтер, В. А.* Распределение фоновых содержаний элементов в донных отложениях озера Имандра / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 128–138.
28. *Даувальтер, В. А.* Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных Субарктических и Арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин, С. С. Сандимиров // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 1. 2012. № 2 (9). С. 54–87.
29. *Даувальтер, В. А.* Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин, Д. Б. Денисов // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 62–75.
30. *Даувальтер, В. А.* Тяжелые металлы в донных отложениях озерно-речной системы озера Инари — река Пасвик / В. А. Даувальтер // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 494–500.
31. *Даувальтер, В. А.* Условия образования железомарганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита / В. А. Даувальтер, Б. П. Ильяшук // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684.
32. *Даувальтер, В. А.* Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова / В. А. Даувальтер // Геохимия. 2006. № 2. С. 237–240.
33. *Даувальтер, В. А.* Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии / В. А. Даувальтер // Известия АН. Серия географическая. 2002. № 4. С. 65–73.
34. *Денисов, Д. Б.* Диатомовые комплексы донных отложений озера Имандра в зоне влияния подогретых вод Кольской АЭС / Д. Б. Денисов, В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 10–24.
35. *Ильяшук, Б. П.* Железомарганцевые конкреции в грунтах озера как фактор, ограничивающий развитие сообществ зообентоса / Б. П. Ильяшук // Экология. 2001. № 6. С. 478–480.
36. Исследование механизмов реагирования биоценозов и их роли в восстановлении экосистем : отчет НИР : 9-96-2026 / рук. Яковлев В. А.; исполн.: Шаров А. Н., Вандыш О. И. // [Фонды ИПЭС КНЦ РАН]. Апатиты, 1997. 33 с.
37. *Кизильштейн, Л. Я.* К вопросу о происхождении фрамбоидальных форм пирита / Л. Я. Кизильштейн // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1969. № 5. С. 61–68.
38. *Кизильштейн, Л. Я.* Фрамбоидальный пирит причастен к возникновению жизни на Земле? / Л. Я. Кизильштейн // Природа. 2007. № 1. С. 49–54.

39. Комплексное изучение и охрана озера Большая Имандра // Комплексное изучение и охрана озера Имандра : отчет о НИР (окончат.) : 2-66-16 / рук. Беляева Г. В. ; исполн.: Чижиков В. В., Воробьева Д. Г. [и др.]. Апатиты : КФАН СССР, 1971.
40. Комплексное изучение Йокостровской и Бабинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема : отчет о НИР (окончат.) : 11-72-16 / рук. Чижиков В. В. ; исполн.: Воробьева Д. Г., Моисеенко Т. И. Апатиты : КФАН СССР, 1976. 264 с.
41. Комплексное исследование марганцевых минералов донных отложений Охотского моря / Н. А. Пальчик, Т. Н. Григорьева, Т. Н. Мороз [и др.] // Фундаментальные основы современного материаловедения. 2009. Т. 6, № 4. С. 73–80.
42. *Корнилов, Ю. Б.* Марганцевые конкреции оз. Большое Миассово (Южный Урал) / Ю. Б. Корнилов, Т. Ю. Веретенникова // Минералогия Урала-III. Миасс : ИМин УрО РАН, 1998. Т. I. С. 150–152.
43. *Кошкин, В. Д.* Состав органического вещества иловых отложений различных озер / В. Д. Кошкин, С. И. Кузнецов, Т. П. Сперанская // Труды лимнолог. станции в Косине. 1939. № 2.
44. *Крючков, В. В.* Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья / В. В. Крючков, Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Апатиты : КФАН СССР, 1985. 132 с.
45. *Крючков, В. В.* Оценка современного состояния экосистемы озера Имандра. Основные проблемы / В. В. Крючков, Т. И. Моисеенко // [Фонды КНЦ РАН]. Апатиты, 1987.
46. *Кузнецов, С. И.* Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах / С. И. Кузнецов. Москва : Изд-во АН СССР, 1952. 300 с.
47. *Лейбович-Гранина, Л. З.* Железомарганцевые стяжения в Байкале / Л. З. Лейбович-Гранина // История современных озер : тезисы докл. VII Всесоюз. симпозиума по истории озер, 25–28 ноября 1986 г. Ленинград, 1986. С. 149–150.
48. *Линник, П. Н.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П. Н. Линник, Б. И. Набиванец. Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. 270 с.
49. *Масленникова, А. В.* Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала / А. В. Масленникова, В. Н. Удачин, В. В. Дерягин. Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2014. 136 с.
50. Миграция и круговорот серы в субарктическом озере Имандра, загрязняющимся стоками горно-металлургического производства / В. А. Даувальтер, Т. И. Моисеенко, И. В. Родюшкин [и др.] // Геохимия. 1999. № 6. С. 626–636.
51. Минералы : справочник / главный редактор Ф. В. Чухров. Москва : АН СССР, 1960. Т. 1. 617 с.
52. Минералы Хибинского массива / В. Н. Яковенчук, Г. Ю. Иванюк, Я. А. Пахомовский, Ю. П. Меньшиков. Москва : Земля, 1999. 326 с.
53. *Моисеенко, Т. И.* Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера / Т. И. Моисеенко, В. А. Яковлев. Ленинград : Наука, 1990. 221 с.
54. *Моисеенко, Т. И.* Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра) / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, И. В. Родюшкин. Апатиты : КНЦ РАН, 1997. 127 с.
55. *Моисеенко, Т. И.* Механизмы круговорота природных и антропогенных металлов в поверхностных водах Субарктики / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, И. В. Родюшкин // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 2. С. 231–243.
56. *Моисеенко, Т. И.* Эколого-токсикологические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики (на примере Кольского Севера) :

специальность : 03.00.16 «Экология» : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Моисеенко Татьяна Ивановна. Апатиты, 1992. 334 с.

57. Мур, Дж. В. Тяжелые металлы в природных водах / Дж. В. Мур, С. Рамамурти. Москва : Мир, 1987. 285 с.

58. Накопление тяжелых металлов в оз. Имандра в условиях его промышленного загрязнения / В. А. Даувальтер, Т. И. Моисеенко, Л. П. Кудрявцева, С. С. Сандимиров // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 3. С. 313–321.

59. Нахшина, Е. П. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Днепра / Е. П. Нахшина, В. П. Белоконь // Водные ресурсы. 1991. № 5. С. 86–93.

60. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, Д. Б. Денисов [и др.] // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 98–107.

61. Нерадовский, Ю. Н. Генезис фрамбоидального пирита в современных осадках озер (Кольский полуостров) / Ю. Н. Нерадовский, В. А. Даувальтер, Е. Э. Савченко // Записки РМО. 2009. Ч. СXXXVIII, № 6. С. 50–55.

62. Никаноров, А. С. Внутреннее строение и минеральный состав железомарганцевых образований пресноводного озера Большое Миассово (Южный Урал) / А. С. Никаноров // Вестник Института геологии Коми НЦ. 2014. № 8. С. 7–11.

63. Никаноров, А. М. Гидрохимия / А. М. Никаноров. Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 2001. 444 с.

64. О находках железомарганцевых конкреций в пресноводных озерах Ильменского заповедника (Южный Урал) / П. М. Вализер, Е. П. Щербакова, Т. Н. Мороз [и др.] // Вестник Института геологии Коми НЦ. 2012. № 12. С. 17–19.

65. Образование осадков в современных водоемах / Н. М. Страхов, Н. Г. Бродская, Л. М. Князева [и др.]. Москва : Изд-во АН СССР, 1954. 792 с.

66. Опекунов, А. Ю. Экологическая седиментология / А. Ю. Опекунов. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2012. 224 с.

67. Оценка баланса тяжелых металлов (Ni и Cu) на водосборе субарктического озера (на примере Чунозера) / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин, С. С. Сандимиров, Н. Е. Раткин // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 3. С. 507–515.

68. Оценка современного состояния и самоочищающей способности поверхностных вод в зоне деятельности промышленных объектов ОАО «Апатит» : отчет о НИР: 2-22-2012 / Ин-т проблем промышленной экологии Севера Кольского науч. центра РАН. Апатиты, 2013. 273 с.

69. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. Москва : Высш. шк., 1983. 342 с.

70. Рихтер, Г. Д. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна / Г. Д. Рихтер. Ленинград : Гостехиздат, 1934. 144 с.

71. Семенович, Н. И. Лимнологические условия накопления железистых осадков в озерах / Н. И. Семенович // Труды Лаборатории озероведения. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1958. Т. 6. 186 с.

72. Скрипченко, Н. С. Фоссилизированные сульфатредуцирующие микроорганизмы в колчеданных рудах / Н. С. Скрипченко // Литология и полезные ископаемые. 1969. № 5. С. 40–59.

73. Слуковский, З. И. Использование сканирующего электронного микроскопа в эколого-геохимических исследованиях донных отложений водоемов Севера России / З. И. Слуковский, В. А. Даувальтер // Труды Ферсмановской научной сессии Геологического института КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 166–169.

74. *Слуковский, З. И.* Морфология и состав техногенных частиц донных отложений оз. Нюдъявр, Мурманская область / З. И. Слуковский, В. А. Даувальтер // Записки РМО. 2019. № 3. С. 102–117.
75. *Слуковский, З. И.* Содержание Ni и Cu в минеральных образованиях природного и техногенного генезиса в донных отложениях озера Нюдъявр (Мурманская область) / З. И. Слуковский, В. А. Даувальтер // Труды Ферсмановской научной сессии Геологического института КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 498–500.
76. *Страхов, Н. М.* К теории геохимического процесса в гумидных зонах // Геохимия осадочных пород и руд : сборник статей / под редакцией Н. М. Страхова. Москва : Наука, 1968. С. 115–121.
77. *Страхов, Н. М.* Сравнительное лимнологическое изучение осадков / Н. М. Страхов // Образование осадков в современных водоемах. Москва : Изд-во АН СССР, 1954. С. 12–32.
78. Структура и динамика сообществ зообентоса оз. Большая Имандра в зоне влияния медно-никелевого комбината / С. А. Валькова, Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, С. С. Сандимиров // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 2. 2012. № 3 (10). С. 22–39.
79. *Терентьев, П. М.* Пространственно-временные особенности накопления никеля и меди в организмах сига озера Имандра (Мурманская область) / П. М. Терентьев, Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер // Материалы IV Всерос. науч. конф. «Биологические ресурсы: изучение, использование, охрана». Вологда, 2018. С. 138–143.
80. Тяжелые металлы в донных отложениях Куйбышевского водохранилища / Е. Ю. Ершова, Е. В. Веницианов, А. Г. Кочарян, Е. К. Вульфсон // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 1. С. 59–65.
81. *Федорова, Е. М.* Озерное железнакопление в пределах Балтийского кристаллического щита / Е. М. Федорова // Накопление вещества в озерах ; под редакцией Л. Л. Россолимо. Москва : Наука, 1964а. С. 164–193.
82. *Федорова, Е. М.* Характеристика железорудных озер Кольского полуострова / Е. М. Федорова // Накопление вещества в озерах ; под редакцией Л. Л. Россолимо. Москва : Наука, 1964б. С. 59–77.
83. Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера) / Т. И. Моисеенко, И. В. Родюшкин, В. А. Даувальтер, Л. П. Кудрявцева. Апатиты : КНЦ РАН, 1996. 263 с.
84. Фракционирование изотопов Fe в результате окислительно-восстановительных процессов в водоеме / Д. Н. Малиновский, И. В. Родюшкин, Е. П. Щербакова [и др.] // Геохимия. 2005. № 8. С. 878–885.
85. *Чижиков, В. В.* Гидрохимия и донные отложения озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения / В. В. Чижиков // Экосистемы озера Имандра под влиянием техногенного загрязнения. Апатиты : КФАН СССР, 1980. С. 24–64.
86. *Шаров, А. Н.* Фитопланктон водоемов Кольского полуострова / А. Н. Шаров. Петрозаводск : Карельский НЦ РАН, 2004. 113 с.
87. *Югай, В. С.* Содержание биодоступных форм соединений металлов в донных отложениях водоемов и коэффициент накопления (Kd) как показатели экологической обстановки водоемов (на примере озер Мурманской области) / В. С. Югай, В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 591–600.

88. Яковлева, Л. В. Донные отложения Кольского полуострова / Л. В. Яковлева // Озера различных ландшафтов Кольского полуострова : сборник статей : в 2 частях / под редакцией Л. Ф. Форш, Г. В. Назарова. Ленинград : Наука, 1974. Ч. 1. С. 195–243.
89. Яковлева, Л. В. Химический состав озерных отложений / Л. В. Яковлева, Л. В. Сергеева // Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озер Южного Урала. Ленинград : Наука, 1978. С. 186–189.
90. Accumulation of heavy metals in Lake Imandra because of its pollution with industrial waste / V. Dauvalter, T. Moiseenko, L. Kudryavtseva, S. Sandimirov // Water Resources. 2000. Vol. 27, No. 3. P. 279–287.
91. Ahl, T. Svenska vattenkvalitet-skriterier — eutrofierande amnen / T. Ahl, T. Wiederholm // SNV PM 918. Uppsala, 1977. 32 p.
92. Alhonen, P. Heavy metal load of Lake Iidesjarvi as reflected in its sediments / P. Alhonen // Aqua Fennica. 1986. Vol. 16, No. 1. P. 11–16.
93. Asikainen, C. A. Accretion of ferromanganese nodules that form pavement in Second Connecticut Lake, New Hampshire / C. A. Asikainen, S. F. Werle // PNAS : [Proc. National Acad. Sci. USA]. 2007. Vol. 104, No. 45. P. 17579–17581.
94. Boudreau, B. P. Metals and models: Diagenetic modelling in freshwater lacustrine sediments / B.P. Boudreau // J. Paleolimnology. 1999. Vol. 22. P. 227–251.
95. Bowen, H. J. M. Trace elements in Biochemistry / H. J. M. Bowen. London : Academic Press, 1966. 274 p.
96. Burdige, D. J. Aporewater — solid phase diagenetic model formanganese in marine sediments / D. J. Burdige, J. M. Gieskes // Am. J. Sci. 1983. Vol. 283. P. 29–40.
97. Calvert, S. E. Diffusion and reaction profiles of dissolved manganese in the pore water of marine sediments / S. E. Calvert, N. B. Price // Earth Planet Sci. Lett. 1972. Vol. 16. P. 245–248.
98. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse / V. Dauvalter, V. Kashulin, S. Sandimirov [et al.] // J. of Environmental Science and Health, part A. 2011. No. 46. P. 1020–1033.
99. Dauvalter, V. Assessment of toxicity of metals accumulated in bottom deposits of lakes / V. Dauvalter // Water Resources. 2000. Vol. 27, No. 4. P. 424–431.
100. Dauvalter, V. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, and As) in bottom sediments of water bodies of the White Sea catchment area on the Kola Peninsula / V. Dauvalter // Geochemistry International. 2006. Vol. 44, No. 2. P. 205–208.
101. Dauvalter, V. Conditions of formation of ferromanganese nodules in the bottom sediments of lakes in the Baltic Shield / V. Dauvalter, B. Ilyashuk // Geochemistry International. 2007. Vol. 45, No. 6. P. 615–619.
102. Dauvalter, V. Geochemistry of rare earth elements in Imandra Lake, Murmansk Area / V. Dauvalter, T. Moiseenko, I. Rodyushkin // Geochemistry International. 1999a. Vol. 37, No. 4. P. 325–331.
103. Dauvalter, V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia / V. Dauvalter // J. Environmental Monitoring. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215.
104. Dauvalter, V. Mercury pollution of Lake Imandra sediments, Murmansk Region, Russia / V. Dauvalter, N. Kashulin // International J. Environmental Research. 2018. Vol. 12, No. 6. P. 939–953.
105. Dauvalter, V. Metal concentrations in sediments in acidifying lakes in Finnish Lapland / V. Dauvalter // Boreal Environment Research. 1997. Vol. 2. P. 369–379.

106. *Davison, W.* A study of the cycling of manganese and other elements in a seasonally anoxic lake, Rosttherne Mere, U.K. / W. Davison, C. Woof // *Water. Res.* 1984. Vol. 18. P. 727–734.
107. *Davison, W.* Conceptual models for transport at a redox boundary / W. Davison ; Stumm W. (Ed.) // *Chemical processes in lakes.* 1985. P. 31–53.
108. *Davison, W.* Iron and manganese in lakes / W. Davison // *Earth-Sci. Rev.* 1993. Vol. 34. P. 119–163.
109. *Davison, W.* Supply of iron and manganese to an anoxic lake basin / W. Davison // *Nature.* 1981. Vol. 290. P. 241–244.
110. *Davison, W.* Transport of iron and manganese in relation to the shape of their concentration — depth profiles / W. Davison // *Hydrobiologia.* 1982. Vol. 92. P. 463–470.
111. *Edgington, D.* Minor element geochemistry of Lake Michigan ferromanganese nodule / D. Edgington, E. Callender // *Earth Planet. Sci. Letters.* 1970. No. 8. P. 97–100.
112. Effect of mining and related activities on the sediment trace element geochemistry of lake Coeur d'Alene, Idaho, USA. Part II: Subsurface sediments / A. J. Horowitz, K. A. Elrick, J. A. Robbins, R. B. Cook // *Hydrological Processes.* 1995. Vol. 9. P. 35–54.
113. *Elderfield, H.* Manganese fluxes to the oceans / H. Elderfield // *Marine Chem.* 1976. Vol. 4. P. 103–120.
114. EPA. Water Quality Criteria 1972. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1973. 15 p.
115. *Förstner, U.* Metals concentrations in recent lacustrine sediments / U. Förstner // *Arch. Hydrobiol.* 1977. Vol. 80. P. 172–191.
116. *Förstner, U.* Metal Pollution in the Aquatic Environment / U. Förstner, G. T. W. Wittmann. 2nd rev. ed. New York : Springer-Verlag, 1981. 486 p.
117. *Förstner, U.* Schwermetalle in Flüssen und Seen / U. Förstner, G. Müller. Berlin : Springer-Verlag, 1974. 265 s.
118. *Håkanson, L.* An ecological risk index for aquatic pollution control — a sedimentological approach / L. Håkanson // *Water Res.* 1980. Vol. 14. P. 975–1001.
119. *Håkanson, L.* Kvicksilver i Vanern — nulage och prognos / L. Håkanson // *SVN PM 563/ NLU Rapport 80.* Uppsala, 1975. 46 p.
120. *Håkanson, L.* Principles of lake sedimentology / L. Håkanson, M. Jansson. Berlin : Springer-Verlag, 1983. 316 p.
121. *Håkanson, L.* Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects / L. Håkanson // *Water Resour. Res.* 1984. Vol. 20, No. 1. P. 41–46.
122. *Harris, R.* Chemistry and origin of freshwater ferromanganese concretions / R. Harris, A. Troup // *Limnol. Oceanogr.* 1970. Vol. 15, No. 5. P. 702–712.
123. *Horowitz, A.* A primer on trace metal-sediment chemistry / A. Horowitz. 2nd rew. ed. Chelsea ; Michigan : Lewis Publishers, 1991. 136 p.
124. *Horowitz, A.* Effect of mining and related activities on the sediment trace element geochemistry of lake Coeur d'Alene, Idaho, USA. Part I: Surface sediments / A. Horowitz, K. Elrick, R. Cook // *Hydrological Processes.* 1993. Vol. 7. P. 403–423.
125. *Ilyashuk, B.* Chironomid responses to long-term metal contamination: a paleolimnological study in two bays of Lake Imandra, Kola Peninsula, Northern Russia / B. Ilyashuk, E. Ilyashuk, V. Dauvalter // *J. Paleolimnology.* 2003. Vol. 30, No. 2. P. 217–230.

126. Manganese redox cycling in Lake Imandra: impact on nitrogen and the trace metal sediment record / J. Ingri, L. Pekka, V. Dauvalter [et al.] // *Biogeosciences Discuss.* 2011. Vol. 8 (1). P. 273–321.
127. *Michard, G.* Theoretical model for manganese distribution in calcareous sediment cores / G. Michard // *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76. P. 2179–2193.
128. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia / D. Gregurek, F. Melcher, V. Pavlov [et al.] // *Miner. Petrol.* 1999. Vol. 65. P. 87–111.
129. *Moiseenko, T.* Geochemical migration and covariation of elements in the Imandra Lake, Barents Region / T. Moiseenko, V. Dauvalter, I. Rodyushkin. Luleå: University of Technology, 1996. 108 p.
130. *Moiseenko, T.* Mechanisms of the cycle of natural and human-introduced metals in surface waters of the Arctic basin / T. Moiseenko, V. Dauvalter, I. Rodyushkin // *Water Resources.* 1998. Vol. 25, No. 2. P. 212–224.
131. *Müller, G.* Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins — Veränderungenseit 1971 / G. Müller // *Umschau in Wissenschaft and Technik.* 1979. Vol. 79. S. 778–783.
132. *Norton, S. A.* Post-glacial iron-rich crusts in hemipelagic deep-sea sediments / S. A. Norton // *Discussion. Geol. Soc. Am.* 1974. P. 159–160.
133. *Olsson, M.* Mercury, DDT and PCB in aquatic test organisms / M. Olsson. Solna : SNV PM 900, 1977. 18 p.
134. *Ouellert, M.* Historical changes in acid precipitation and heavy metals deposition origination from fossil fuel combustion in eastern north America as revealed by lake sediment geochemistry / M. Ouellert, H. Jones // *Water, Air, Soil Pollut., Sci. Tech.* 1983. Vol. 15. P. 115–130.
135. *Robbins, J.* Diagenesis of manganese in Lake Michigan sediments / J. Robbins, E. Callender // *Am. J. Sci.* 1975. Vol. 275. P. 512–525.
136. *Rognerud, S.* Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway / S. Rognerud, S. Norton, V. Dauvalter // *NIVA-Report 522/93.* Oslo, 1993. 18 p.
137. Selected aspects of the current state of fresh water resources in the Murmansk Region, Russia / N. Kashulin, V. Dauvalter, D. Denisov [et al.] // *J. Environmental Sci. and Health, Part A.* 2017. Vol. 52, No. 9. P. 921–929.
138. *Skogheim, O.* Rapport fra Arungenprosjektet / O. Skogheim // *As-NLH, Nr. 2.* Oslo, 1979. 7 p.
139. Some relationships between algal standing crop, water chemistry, and sediment chemistry in the English Lakes / E. Gorham, W. Lund, J. Sander, W. Dean Jr. // *Limnol. Oceanogr.* 1974. Vol. 19. P. 601–617.
140. *Sommers, M.* Freshwater ferromanganese stromatolites from Lake Vermilion, Minnesota: Microbial Culturing and Environmental Scanning Electron Microscopy Investigation / M. Sommers, M. Dollhopf, S. Douglas // *Geomicrobiol. J.* 2002. Vol. 19. P. 407–427.
141. Sulfur migration and cycle in a subarctic lake contaminated by wastes of a mining complex: a case study of Lake Imandra / V. Dauvalter, T. Moiseenko, I. Rodyushkin [et al.] // *Geochemistry Intern.* 1999. Vol. 37, No. 6. P. 552–561.
142. Svenska vattenkvalitets kriterier — metaller / K. Beijer, B.-E. Bengtsson, A. Jernelev [et al.]. Stockholm : IVL Rapport B398, 1977. 24 p.

143. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments / S. Norton, P. Dillon, R. Evans [et al.] // Sources, Deposition and Capony Interactions. V. III, Acidic Precipitation / S. E. Lindberg [et al.] (eds.). New York : Springer-Verlag, 1990. P. 73–101.
144. *Tolonen, K.* History of lake acidification and air pollution studied on sediments in South Finland / K. Tolonen, T. Jaakkola // *Ann. Bot. Fennici*. 1983. Vol. 20. P. 57–78.
145. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment / S. Norton, P. Appleby, V. Dauvalter, T. Traaen // NIVA-Report 41/1996. Oslo, 1996. 18 p.
146. *Turekian, K.* Distribution of the elements in some major units of the earth's crust / K. Turekian, K. Wedephol // *Bull. Geol. Soc. Am.* 1961. Vol. 32. P. 175–192.
147. *Wetzel, R. G.* *Limnology* / R. G. Wetzel. Philadelphia : W.B. Saunders Company, 1975. 379 p.
148. *Williams, T. M.* Geochemistry and origins of lacustrine ferromanganese nodules from the Malawi Rift, Central Africa / T. M. Williams, R. B. Owen // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. Vol. 56, No. 7. P. 2703–2712.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупнейший водоем Мурманской области — озеро Имандра — столетие испытывает загрязнение промышленными сточными водами горнодобывающих и металлургических предприятий и коммунально-бытовыми стоками населенных пунктов, что значительно преобразовало его химический состав воды и донных отложений, ухудшило экологическое состояние озера и изменило структуру гидробионтов. Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение на пути основных транспортных магистралей Мурманской области привело к развитию мощного индустриального комплекса на территории водосбора, что, несомненно, вызвало высокую антропогенную нагрузку на водоем. Среди основных производств на территории водосбора озера выделяются горнодобывающая (АО «Апатит», Ковдорский ГОК) и горно-металлургическая (комбинат «Североникель») промышленность, железорудное производство (АО «Олкон»), энергетический комплекс (Кольская АЭС, каскад Нивских ГЭС, Апатитская ТЭЦ), а также муниципальные стоки населенных пунктов, расположенных там же.

На основании проведенных в последнее десятилетие исследований можно заключить, что наиболее загрязненная акватория озера — Большая Имандра, принимающая промышленные стоки медно-никелевого и апатитнефелинового производств. В настоящее время в самом удаленном плесе — Бабинской Имандре создана экологическая ситуация, незначительно, но достоверно отличающаяся от состава вод западной части губы Зашеечная на акватории плеса Йокостровская Имандра. Сточные воды промышленных предприятий и городов, изменение температурного режима, нарушение многолетнего устоявшегося хода уровня озера и, соответственно, изменение гидрологического цикла непосредственно повлияли на химический состав вод. Более значительные отличия гидрохимических параметров наблюдаются в восточной части губы Зашеечная и на стоке из оз. Имандра, преимущественно под действием течений загрязненных вод северных плесов — Большой и Йокостровской Имандры.

Сезонная цикличность и природная стабильность химического состава вод в озере, поддерживавшиеся многие годы за счет динамического равновесия природных процессов, нарушены. Сезонная динамика биогенных веществ выражена слабо, резкие колебания их концентраций связаны с различиями в поверхностном и придонном горизонтах, а снижение содержания общего фосфора в плесе Бабинская Имандра обусловлено замещением более холодными водами, поступающими с водосбора. Несмотря на понижение температурного градиента, по содержанию биогенных веществ в этой акватории водоем сохраняет признаки эвтрофирования. Содержание основных загрязняющих веществ (никеля и меди) снижается также за счет разбавления массами озерной воды и воды втекающих рек, а также благодаря быстрому водообмену.

Форелевое хозяйство, расположенное вблизи устья сбросного канала Кольской АЭС, на химический состав вод в губе Молочной значительного влияния не оказывает, правда, содержание биогенных веществ в районе устья канала несколько выше, чем на остальной акватории оз. Имандра. Таким образом, в губу Молочную по сбросному каналу поступает вода, качественный состав которой все еще отличается (но уже не так значительно) от природных свойств

плеса Бабинская Имандра как по гидрологическим, так и по гидрохимическим характеристикам.

На основании детального анализа химических свойств вод южной части оз. Имандра можно выделить несколько специфичных маркеров (гидрохимических показателей), указывающих на опосредованное влияние существующей схемы технического водоснабжения КАЭС на экосистему плесов Имандры (общая минерализация, содержание в воде натрия, сульфатов, биогенных элементов (азот, фосфор), меди, никеля, а также определить их фоновые современные значения.

Для оценки состояния озера могут быть использованы данные фоновые значения: рН — 7,33 ед.; Na — 5,8 мг/л; SO₄ — 9,4 мг/л; общая минерализация — 40,3 мг/л; N_{общ} — 150 мкгN/л; P_{общ} — 6 мкгP/л.

Учитывая весь комплекс влияния загрязненных вод, поступающих из Большой Имандры, и условия распространения теплых вод Кольской АЭС по акватории южной части оз. Имандра, а также их воздействие на различные компоненты экосистемы, можем сделать заключение о сходстве природных свойств вод в плесах Йокостровская и Бабинская Имандра и предположить наличие циркуляционного потока между этими плесами, который наиболее значительно выражен в зимний и весенний периоды за счет сработки вод каскадом Нивских ГЭС. В этот период в проливах наблюдается слабое транзитное течение (до 2–3 см/сек).

Исследования донных отложений оз. Имандра проводятся уже почти столетие, начиная с исследований Г. Д. Рихтером (1934), которые, по существу, являются одним из первых научных исследований крупнейшего водоема Мурманской области. До 1960-х гг., когда были начаты систематические исследования состояния озера, химический состав ДО практически не изучался. Химический состав ДО в исследованиях до 1990-х гг. определялся с помощью спектрального полуколичественного метода.

С 1990-х гг., то есть со времени образования Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, его сотрудниками проводятся детальные исследования состояния и химического состава ДО оз. Имандра уже с использованием современных методов атомно-абсорбционной спектроскопии. За 30-летний период существования Института проделана грандиозная работа: определены фоновые содержания элементов, исследованы их вертикальное распределение в толще донных отложений, включая историю седиментации в условиях природного и антропогенного осадконакопления, территориальное распределение элементов в различных плесах и акваториях озера, проведена оценка экологического состояния озера на основе результатов изучения химического состава донных отложений, исследуется минеральный состав осадков.

Информация о фоновых концентрациях элементов в ДО необходима, чтобы определить интенсивность антропогенной нагрузки на озеро и степень его загрязнения. Установлено, что средние фоновые концентрации большинства элементов в ДО в оз. Имандра немного больше средних содержаний элементов в ДО 200 малых озер Мурманской области (Даувальтер, Кашулин, 2014), что, вероятно, связано с наличием большого количества месторождений и залежей полезных ископаемых и выходов коренных скальных пород на водосборе оз. Имандра, что было подтверждено факторным анализом. Первый фактор анализа, имеющий наибольший вес (40 %), объединяет элементы, содержащиеся

в повышенных содержаниях в породообразующих минералах горных пород, слагающих водосбор оз. Имандра, — тяжелые металлы медь и никель (Мончегундры), щелочные и щелочноземельные металлы калий, натрий, стронций, кальций, а также алюминий и фосфор (Хибинский щелочной массив). Во второй фактор (вес 17 %) входят элементы, чутко реагирующие на изменение геохимических условий, существующих в толще воды и донных отложениях озера (в первую очередь окислительно-восстановительный потенциал и кислотнo-щелочные условия), — железо, марганец, кобальт и мышьяк.

Самые значительные преобразования химического состава в последние 60–90 лет произошли в толще ДО плеса Большая Имандра, что связано в первую очередь с деятельностью гигантов горной промышленности на берегах озера — комбината «Североникель» и АО «Апатит». Концентрации никеля и меди к поверхности донных отложений Мончегубы, куда поступают стоки комбината «Североникель», увеличились на 3 и 2 порядка соответственно. Рост содержания более чем на порядок зафиксирован и для остальных тяжелых металлов — кобальта, цинка, кадмия, свинца, мышьяка, ртути и хрома, являющихся в медно-никелевом производстве сопутствующими. Влияние стоков АО «Апатит» сказалось в высоких концентрациях элементов, присутствующих в апатитнефелиновых рудах и вскрышных породах (содержатся в минералах апатите и нефелине — кальций, фосфор, натрий, калий, алюминий, а также сопутствующие им щелочноземельный металл стронций и редкоземельные элементы). В вертикальном распределении ртути в ДО исследуемых станций Большой Имандры четко отмечается приповерхностный максимум до 2,3 мкг/г на глубине 7–9 см, что на 2 порядка больше средних фоновых концентраций. Увеличение содержания ртути в ДО может быть связано с использованием гремучей ртути (ртутная соль фульминовой (гремучей) кислоты $\text{Hg}(\text{CNO})_2$) в капсулах-детонаторах при проведении взрывных работ на первых этапах разработки апатитнефелиновых месторождений.

Факторным анализом выявлены определяющие факторы, влияющие на формирование химического состава толщи ДО оз. Имандра. По всем исследуемым тяжелым металлам, входящим в состав стоков комбината «Североникель» (Cu, Ni, Zn, Co, Cd, Pb, As, Hg), отмечаются высокие значения коэффициента в первом факторе, вес которого имеет подавляющее преимущество (36 %). Второй фактор (с весом 26 %) объединяет щелочные и щелочноземельные металлы (за исключением магния), алюминий и фосфор, то есть элементы, поступающие в озеро в составе сточных вод апатитнефелинового производства. Третьим фактором, имеющим сравнительно небольшой вес (11 %), являются, вероятно, геохимические условия в толще воды и донные отложения, в первую очередь окислительно-восстановительная обстановка, что сказалось в нахождении в этом факторе марганца и железа — металлов, чутко реагирующих на изменения физико-химических условий.

Геохимический состав поверхностного слоя ДО оз. Имандра за последние 50 лет исследований претерпел значительные изменения по всей акватории вследствие как прямого поступления сточных вод предприятий горно-металлургического комплекса (Большая и Йокостровская Имандра), так и аэротехногенного загрязнения водосбора озера и ветровых нагонных течений (Бабинская Имандра). Горно-металлургические, горнодобывающие и горно-перерабатывающие предприятия — комбинат «Североникель», АО «Апатит»

и АО «Олкон» вносят наибольший вклад в эти преобразования химического состава донных отложений. В результате металлургической деятельности концентрации исследуемых тяжелых металлов (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, что сопоставимо с их содержанием в кондиционной руде. Установлено также влияние изменения физико-химических условий в толще воды и донных отложениях озера на распределение железа и марганца, что связано с зависимостью поведения этих элементов от окислительно-восстановительной обстановки. Влияние стоков предприятий добычи и переработки апатитнефелиновых руд проявилось в увеличении содержания щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca, Sr), а также фосфора и алюминия. Антропогенная нагрузка на озеро в последние десятилетия достигла громадных масштабов, что сказалось не только в увеличении содержания тяжелых металлов и других элементов в воде и ДО, а также выразилось в резком ухудшении экологического состояния озера и снижении видового разнообразия гидробионтов, упрощении их структуры, смене ранее доминирующих форм на устойчивые к загрязнению организмы.

Подсчитано, что в донных отложениях оз. Имандра за практически столетнюю историю освоения территории водосбора накоплено 6 500 т никеля, 1 200 т меди, 120 т кобальта, 230 т цинка, 10 т кадмия, 25 т свинца, 10 т мышьяка, 2 т ртути.

Приоритетные загрязнители никель и медь, а также сопутствующие им кобальт, цинк и ртуть накопились в ДО оз. Имандра в максимальных количествах, и процентное распределение их по плесам озера примерно одинаковое: ~80 % — в Большой, ~20 % — в Йокостровской и первые проценты — в Бабинской Имандре. Мышьяк и кадмий распространены несколько по-другому: ~60 % — в Большой, ~30 % — в Йокостровской и ~10 % Бабинской Имандре.

Распределение свинца отличается от всех тяжелых металлов: в загрязненных ДО Большой и Йокостровской Имандры накоплено 39 и 35 % соответственно, а более 25 % — в Бабинской Имандре, то есть распределение по плесам относительно равномерное.

Следовательно, несмотря на то, что на долю Большой и Йокостровской Имандры приходится примерно по 40 % общей площади озера, занятой иловыми отложениями, 60–80 % накопленных никеля, меди, кобальта, кадмия, цинка и мышьяка приходится на Большую Имандру, на Йокостровскую — 20–30 %, и только свинца в этих плесах накоплено в одинаковых количествах.

На долю Бабинской Имандры приходится около 20 % от общей площади озера, занятой иловыми отложениями, а количество накопленных металлов в этом плесе находится в пределах 1–26 % (максимальное — для Pb), то есть в этом плесе накопилось меньшее количество загрязняющих ТМ. В настоящее время ДО не являются существенным источником вторичного загрязнения воды озера никеля и меди, что, однако, не снижает опасности загрязнения воды этими металлами в будущем, в особенности в плесе Большая Имандра, например, когда комбинат «Североникель» значительно снизил выбросы никеля и меди в воду и атмосферу после остановки плавильных цехов. Помимо стоков и атмосферных выбросов предприятий, расположенных на водосборе озера, дополнительным источником поступления тяжелых металлов является сам водосбор озера, где в почвах и растениях за почти вековой период эксплуатации предприятий

накопилось значительное количество этих металлов, которые после отмирания растений и в процессе своей миграции в почве и горных породах при главном участии подземных вод поступают в озеро.

В последнее десятилетие в ДО оз. Имандра проведены минералогические исследования, позволившие установить процессы образования аутигенных минералов, формирующихся внутри донных отложений в специфических физических, химических и биологических условиях, выявить минералы, привнесенные в озеро притоками в результате выветривания коренных пород, и техногенные минералы, образованные в процессе горно-металлургического производства. В донных отложениях оз. Имандра обнаружены и были исследованы аутигенные минералы железа, так как одними из ведущих контролирующих факторов накопления элементов, в том числе и диагенетической трансформации железа, являются физико-химические условия в донных отложениях — окислительно-восстановительная обстановка (редокс-потенциал E_h) и кислотно-щелочные условия (водородный показатель pH). В донных отложениях в окислительной обстановке при значениях pH от слабокислотных до щелочных, железо существует в форме гидроксидов железа трехвалентного (Fe^{3+}), которое совместно с марганцем образует железомарганцевые образования, то есть конкреции, каймы обрастания и корки. В восстановительной обстановке при снижении значений E_h двухвалентное железо может осаждаться в виде сульфидов, главным образом пирита FeS_2 , являющегося плохо растворимыми соединениями.

В истории генезиса пирита выделены три стадии:

- 1) зарождение индивидов пирита (индивидуальная);
- 2) образование сфероидов (сфероидальная);
- 3) кристаллизация глобул (глобулярная).

Анализ нескольких образцов ДО Зашеечной губы оз. Имандра с высоким содержанием железа — до 32 % (и в ряде случаев фосфора) установил, что в этих осадках железо в основном связано с минералом магнетитом, вернее с его разновидностью — Ст-магнетитом, содержание хрома в котором колеблется от 5 до 10 %.

В донных отложениях оз. Нюдъявр обнаружены минеральные частицы округлой или неправильной формы, имеющие явное техногенное происхождение, в них установлено содержание никеля от 29 до 69 %, меди — до 51 %. В состав изученных минеральных образований также входят железо, сера, хром, кобальт, кремний и кислород. Во всех изученных образцах ДО оз. Нюдъявр встречаются агрегаты пирита (сфероиды, глобулы). В связи с тем, что оз. Нюдъявр поставляет свои воды в Монче-губу, обнаруженные в донных отложениях оз. Нюдъявр минералы с большой вероятностью могут быть встречены и в оз. Имандра.



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

