

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ СЕВЕРА

# СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ СЕВЕРА

# MODERN RESEARCH ON NORTHERN WATER BODIES

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

# СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ СЕВЕРА

*Учебное пособие*

# MODERN RESEARCH ON NORTHERN WATER BODIES

*Textbook*

Петрозаводск
2021

УДК 556.5(075)(470.1/.2)
ББК 26.222я7(21)
С56

Главные редакторы

*С. П. Гриппа,* канд. геогр. наук,
*Т. И. Регеранд,* канд. биол. наук

Редакционная группа

А. В. Толстиков, канд. геогр. наук, Н. Е. Галахина, канд. хим. наук,
З. И. Слуковский, канд. биол. наук

Рецензент

Н. В. Кармазина, канд. пед. наук

**Современные исследования водоемов Севера** : учебное пособие : [сб. лекций] / гл. редакторы:
С56 С. П. Гриппа, Т. И. Регеранд ; ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2021. – 214 с.

ISBN 978-5-9274-0911-2

Предлагаемое учебное пособие подготовлено как сборник лекций научных сотрудников Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН), Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН), преподавателей Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (г. Санкт-Петербург) и Петрозаводского государственного университета.

Учебное пособие состоит из 13 лекций, каждая включает теоретическую часть, контрольные вопросы и практические задания, содержит иллюстративный материал.

Сборник лекций может быть использован в качестве дополнительного учебного пособия для аспирантов, студентов вузов, учащихся старших классов и преподавателей средних общеобразовательных школ, абитуриентов, а также в широких научно-познавательных целях.

УДК 556.5(075)(470.1/.2)
ББК 26.222я7(21)

This textbook is a compendium of lectures by researchers from the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS (NWPI KarRC RAS) and Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre RAS (INEP KSC RAS), and professors from the Herzen State Pedagogical University of Russia in St. Petersburg and Petrozavodsk State University.

The textbook comprises 13 lectures, each made up of theoretical material, test questions, and practical tasks, and supplied with artwork.

This volume of lectures can be used as a supplementary learning aid for BSc, MSc, and PhD students, senior schoolchildren and high school teachers, students-to-be, or for general educational purposes.

ISBN 978-5-9274-0911-2

© Авторы статей, 2021
© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2021
© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2021

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН представляет сборник лекций «Современные исследования водоемов Севера», который издается по решению Ученого совета института и при поддержке Министерства образования и спорта Республики Карелия как учебное пособие. Лекции подготовлены научными сотрудниками Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН), Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН), преподавателями Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (г. Санкт-Петербург) и Петрозаводского государственного университета.

Данное учебное пособие было запланировано к изданию в рамках работы Полярной школы-практики (Зимняя лимнологическая школа-практика), которая проводилась как 2-й этап VI Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» ("Water Resources: Research and Management" (WRRM)) (http://water.krc.karelia.ru).

Учебное пособие состоит из 13 лекций (каждая включает теоретическую часть, контрольные вопросы и практические задания, содержит иллюстративный материал) и предназначено для учащихся и преподавателей средних и высших учебных заведений.

Зимняя лимнологическая школа-практика является традиционным мероприятием, проводимым с 2006 г. при тесном сотрудничестве ИВПС КарНЦ РАН и Университета Хельсинки с целью организации научных исследований в области гидрофизики и мероприятий по экологическому просвещению. Со стороны России работы проводились согласно Программе Президиума РАН «Поддержка молодых ученых» (раздел «Поддержка деятельности институтов РАН по привлечению талантливой молодежи к научной работе»).

До 2021 г. местом проведения школы-практики была научная станция Ламми (Университет Хельсинки, Финляндия), инфраструктура которой позволяла участникам проживать и осуществлять свои исследовательские проекты (научные лаборатории и оборудование, библиотека, столовая, номера для проживания), а также обмениваться опытом с иностранными коллегами.

Мировые события, связанные с пандемией коронавируса, стали причиной изменения формата и места проведения Зимней лимнологической школы-практики. В 2021 г. она была организована и проведена при совместном участии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (г. Петрозаводск, Республика Карелия) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (г. Апатиты, Мурманская область) за Полярным кругом, на территории Мурманской области, на базе Кольского научного центра РАН.

Участники размещались в гостинице «Дом ученых “Тиетта”» Кольского научного центра РАН, на берегу оз. Имандра, крупнейшего водоема Мурманской области, в 20 км от г. Апатиты.

Работа школы-практики проходила по следующим направлениям:

– формирование водных ресурсов суши в условиях антропогенных воздействий;

– проблемы рационального природопользования, охраны и управления водными ресурсами;

– проблемы трансграничных водных объектов России;

– донные отложения: геохимия, палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции водоемов и их водосборов;

– моделирование гидрологических и экосистемных процессов;

– реакция водных объектов на изменение климата;

– функционирование водных сообществ в условиях изменения климата;

– формирование и современное состояние биоресурсов водоемов;

– биоиндикация и биомониторинг, оценка экотоксикологического состояния водных объектов;

– влияние гидрофизических процессов в водоеме на состояние и развитие гидробионтов.

Следуя традициям наших совместных с финскими коллегами зимних школ, Полярная школа-практика содержала *теоретическую часть*, в рамках которой ведущими специалистами в области гидрофизики, гидробиологии, гидрохимии были прочитаны очные и дистанционные лекции,

а также *практическую часть* с полевыми работами на оз. Имандра, обработкой материалов под руководством наставников и защитой проектов в последний день мероприятия. Для выполнения исследовательских проектов все участники предварительно были разделены на четыре группы: гидрофизики, гидрохимики, гидробиологи, ихтиологи.

Данное учебное пособие является вкладом авторов, ученых и преподавателей в реализацию мероприятий по проведению объявленного Президентом России В. В. Путиным 2021 года годом науки и технологий. Согласно информации, представленной в СМИ, «одна из задач года – рассказать населению страны о том, какими достижениями и учеными может гордиться наша страна. В течение всего года при поддержке государства будут проходить просветительские мероприятия с участием ведущих деятелей науки, запускаться образовательные платформы и конкурсы для всех желающих». Кроме того, «задача года – привлечь талантливую молодежь в сферу науки и технологий, повысить вовлеченность профессионального сообщества в реализацию Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, а также сформировать у граждан нашей страны четкое представление о реализуемых сегодня государством и бизнесом инициативах в области науки и технологий» (https://minobrnauki.gov.ru/god-nauki/).

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН и оргкомитет Полярной школы-практики выражают благодарность организаторам мероприятия и авторам лекций за активное содействие в подготовке данного издания.

*Т. И. Регеранд, А. В. Толстиков, Н. Е. Галахина, З. И. Слуковский*

# ГЕОГРАФИЯ. КЛИМАТ
# GEOGRAPHY. CLIMATE











УДК 551.5(470.22)

# КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КАРЕЛИИ

**Л. Е. Назарова**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,*
*ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

**Аннотация.** В данной лекции приводятся сведения из истории возникновения науки метеорология, развития метеорологических наблюдений на территории Карелии, а также общая характеристика климатических условий данного региона. Определены основные климатообразующие факторы, влияющие на формирование климата Карелии. Подробно рассмотрены ветровой и температурный режимы, режим атмосферных осадков, изменение продолжительности солнечного сияния и количества облачности. Отдельно приведены сведения для климата г. Петрозаводска. В тексте даны определения используемых метеорологических терминов, приведен анализ временных рядов основных климатических параметров. В условиях потепления климата отмечено изменение климатических норм, что показано на примере данных многолетних наблюдений на метеорологической станции Петрозаводск. Представленный материал может быть использован при подготовке лекций для студентов географических специальностей ПетрГУ и при изучении курса географии в общеобразовательных школах Карелии.

**Ключевые слова:** метеорология; климат; погода; температура воздуха; осадки; ветер; солнечное сияние.

## CLIMATIC CONDITIONS IN THE REPUBLIC OF KARELIA

**L. E. Nazarova**

*Northern Water Problems Institute,*
*Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

**Summary.** This lecture tells about the history of meteorology as a science, and the development of meteorological observations in Karelia. Also, a general description of climatic conditions in the region is given. The main climate-generating factors for Karelia are indicated. Such parameters as wind, air temperature, atmospheric precipitation, sunshine duration, and cloudiness are considered in detail. Climate information for the City of Petrozavodsk is specifically highlighted. Definitions of meteorological terms used are given; long-term observational dataseries on the main climate parameters are analyzed. Regional climate warming entails a change in climate normals, as evidenced by long-term observations at the Petrozavodsk weather station. The information can be used in lecturing students of geography at the Petrozavodsk State University and in studying geography in Karelian schools.

**Keywords:** meteorology; climate; weather; air temperature; precipitation; wind; sunshine.

**Тема лекции.** «Климатические условия на территории Карелии».

**Цель.** Познакомить слушателей с основными условиями формирования и основными характеристиками климата Карелии.

**План изложения материала.**

Введение. Основные этапы становления науки метеорология.

1. Развитие метеорологических наблюдений на территории Карелии.
2. Материал и методы.
3. Климатообразующие факторы.
4. Основные характеристики климата Карелии.

## Изложение материала

**Введение. Основные этапы становления науки метеорология.** Вопросы формирования и динамики климата изучаются в рамках науки климатология, которая, в свою очередь, является звеном более общей и древней науки – метеорология. Метеорология – это наука о погоде, т. е. наука, изучающая процессы, происходящие в атмосфере, и разрабатывающая прогнозы будущих изменений. Слово «метеорология» появилось в IV в. до н. э. Зарождение этой науки связано с именем великого греческого мыслителя Аристотеля. Он занимался не только вопросами философии, но и биологии и физики. В те времена считалось, что все изменения на небе происходят в одной сфере и должны изучаться одной наукой. Аристотель был убежден, что дожди, кометы, град, радуги, различные сияния – это всё предметы, находящиеся в воздухе. В соответствии со своими представлениями он подобрал название тому, что видел – предметы в воздухе, на греческом языке «τα μετεωρα» (та метеора). Свои знания и представления он обобщил в трактате «Метеорологика, или Трактат о небесных явлениях». Именно с этой работой связано рождение науки об атмосфере и погоде – метеорологии.

Сказать, когда появились первые прогнозы погоды, сложно, поскольку первыми прогнозами по сути своей являются народные приметы. Метеорологический словарь определяет приметы погоды как эмпирические правила, относящиеся к ожидаемым изменениям погоды, возникающие в результате многовекового народного опыта и передаваемые в порядке фольклорной традиции, часто в виде пословиц. Еще античные ученые отмечали связь между отдельными погодными явлениями, но дальше этого они не пошли. Первые прогнозы, основанные на инструментальных наблюдениях, появились в середине XIX в., и связаны они с именем английского моряка, капитана Роберта Фицроя (в другом написании – Фиц Роя). Он впервые обратил внимание на связь между атмосферным давлением и характером погоды, в своей работе использовал наблюдения по барометру. При повышении атмосферного давления погода была ясная, а при низких значениях давления наступало ненастье. К сожалению, его прогнозы не всегда были удачны, но у него появились последователи, стала развиваться наука синоптическая метеорология. Синоптики – это метеорологи, специализирующиеся на анализе атмосферных физических процессов и предсказании будущего состояния погоды. По-гречески «синоптикос» – обозревающий всё вместе.

В России в середине XVII в. в царствование Алексея Михайловича стали фиксировать погоду в «Дневальных записках приказа тайных дел». Позднее эти записки послужили примером для Петра I при составлении дневников и походных журналов, в которые заносились сведения о состоянии погоды. Также по завещанию Петра I в декабре 1725 г. в Санкт-Петербурге приступили к наблюдениям на первой в Российской империи метеорологической станции.

**1. Развитие метеорологических наблюдений на территории Карелии.** Для территории Карелии сведения о первых метеорологических наблюдениях относятся к 1810-м гг. (Повенец, Петрозаводск, Сердоболь), но были они весьма отрывочны и интерес представляют скорее для историков. Постоянные наблюдения стали проводиться в 1830-х гг. в г. Кеми, позднее – на острове Валаам, в г. Петрозаводске, с. Паданах и т. д. В г. Петрозаводске первая метеорологическая станция была открыта в 1857 г. в центральной части города при врачебном управлении, затем она была перенесена в северо-западную часть города, потом во двор гимназии, расположенной в 3 км к востоко-северо-востоку. Так станцию перемещали по территории города, пока в июне 1949 г. на территории плодово-ягодного питомника в районе Сулажгоры не была организована новая станция, которую в 1954 г. перенесли на 1 км к северо-западу, где она и находится в настоящее время.

В середине 1980-х гг. метеорологическая сеть Карелии включала в себя 35 метеорологических станций и около 200 метеорологических постов. К настоящему времени наблюдения ведутся на 17 метеорологических станциях, 7 автоматических метеорологических и 2 аэрологических станциях.

**2. Материал и методы.** В нашем исследовании использованы данные метеорологических наблюдений на станциях Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенных на территории Карелии. Данные многолетних инструментальных наблюдений метеорологических станций являются основой для работ, направленных на изучение

климата Республики Карелия. При этом нужно помнить, что говоря о климате, мы имеем в виду многолетний режим атмосферных условий (условий погоды), характерный для каждого данного места Земли, а говоря о погоде – непрерывно меняющееся состояние атмосферы в данном месте в данный момент времени.

В работе будет использоваться понятие «климатическая норма». Климатическая норма – это характеристика климата, статистически полученная из многолетнего ряда наблюдений. По решению Всемирной метеорологической организации (ВМО) для расчета используют 30-летние базовые периоды. Единые временные отрезки и используемые методики позволяют получать сопоставимые результаты для различных точек наблюдения. На 16-й сессии ВМО в 2014 г. было решено, что в качестве базового и стабильного периода остается период 1961–1990 гг. В связи с изменением глобального климата ВМО одобрило использование так называемых оперативных норм, которые будут обновляться каждые 10 лет. В 2021 г. нормы вновь обновятся, периодом расчета станет 1991–2020 гг. Все новые климатические нормы будут сравнивать с периодом 1961–1990 гг., выявляя тенденции изменения климата.

**3. Климатообразующие факторы.** Карелия расположена в северо-западной части умеренного климатического пояса. Климатический режим республики можно охарактеризовать как переходный от морского к континентальному; по классификации Б. П. Алисова, в основу которой положена зависимость возникновения различных типов климата от условий общей циркуляции атмосферы [Алисов, 1957], климат Карелии относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Это означает, что в течение года для Карелии характерно преобладание воздушных масс атлантического и арктического происхождения.

**4. Основные характеристики климата Карелии.** Под общей циркуляцией атмосферы понимают систему движений (течений) атмосферного воздуха в масштабе всего земного шара. С установлением западной формы переноса наблюдается усиленная активизация циклонической деятельности, что приводит к изменению погодных условий в сторону пасмурных. Воздушные массы с Атлантики делают климат республики существенно более теплым и влажным, чем климат других районов России, расположенных восточнее на этой же широте. Летом циклоны, сформировавшиеся над Атлантикой, приносят в Карелию затяжные дожди и прохладную погоду, плотную низкую облачность. При господстве западного переноса зимой устанавливается теплая мягкая погода, температура воздуха во все зимние месяцы может подниматься выше нуля.

Циклоны возникают не только над Атлантическим океаном, но и в районе Средиземного моря и низких среднеазиатских широт. С приходом этих циклонов летом связана необычная для севера жара. Наиболее яркий пример прихода таких воздушных масс – жаркое и сухое лето 1972 г. Температура воздуха во все летние месяцы поднималась до 30 ºС и выше, что вместе с отсутствием осадков послужило причиной многочисленных лесных пожаров, понижения уровня озер, резкого уменьшения стока рек. Циклоны, образовавшиеся над Баренцевым и Карским морями, над просторами Центральной Арктики, приносят арктический воздух, что вызывает зимой резкое похолодание при безоблачном ясном небе. Летом устанавливается ясная, сухая и холодная погода с устойчивыми северными ветрами.

Гораздо меньше проявляется над территорией Карелии восточная форма циркуляции. При этой форме переноса наблюдается перемещение барических образований с востока или северо-востока. Продолжительность и устойчивость восточной циркуляции обычно меньше, чем западной. Восточный тип циркуляции в основном проявляется в зимний период, что приводит к установлению низких температур воздуха, уменьшению облачных дней, малому количеству осадков. К апрелю этот тип циркуляции заметно ослабевает и сменяется на меридиональный. К началу летнего сезона устанавливается господство западного переноса воздушных масс.

Особенности циркуляционного режима, а также количество солнечной радиации, поступающей соответственно географической широте территории, близость Балтийского, Белого и Баренцева морей, интенсивная циклоническая деятельность во все сезоны года, комплекс местных, крайне разнообразных природных условий (рельеф, обилие озер и болот, значительная лесистость и т. п.) обусловливают продолжительную, но не суровую зиму; позднюю весну с частыми возвратами

холодов; прохладное короткое лето; высокую относительную влажность воздуха; значительное количество осадков и неустойчивые погодные условия в течение всех сезонов. Таким образом, особенности атмосферной циркуляции, близость крупных водных объектов и солнечная радиация, поступающая согласно географической широте, являются основными климатообразующими факторами для территории Карелии.

В среднем за год на исследуемой территории, относящейся к зоне избыточного увлажнения, выпадает 550–750 мм осадков. Годовое их количество возрастает в направлении с севера на юг. Однако на распределение осадков большое влияние оказывают орографические особенности местности и характер подстилающей поверхности, ведущие к нарушению плавного хода изменения количества осадков. Довольно заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов, таких, как Белое море, озера Ладожское, Онежское, Топозеро, Пяозеро и т. д. В районе побережья Белого моря в границах Карелии отмечаются наименьшие в республике годовые суммы осадков (500–550 мм). «Равнинная, покатая к Белому морю территория побережья в средней и северной части покрыта огромными массивами болот, открыта для воздействия ветров на значительные расстояния, вплоть до возвышенностей западной Карелии. При таких условиях рельефа влияние Белого моря сказывается здесь в смягчении среднегодовых температур воздуха, а также в создании минимума осадков в северной приморской полосе. Летом Белое море холоднее суши, и воздух, поступая с моря на сушу, нагревается и при этом не только не выделяет свою влагу, а наоборот поглощает образовавшуюся на суше влагу» [Романов, 1961].

В начале XXI в. отмечался рост количества выпадающих атмосферных осадков. На рис. 1 приведены данные наблюдений на МС Петрозаводск. Однако мы можем видеть, что тенденция изменения не является однонаправленной.

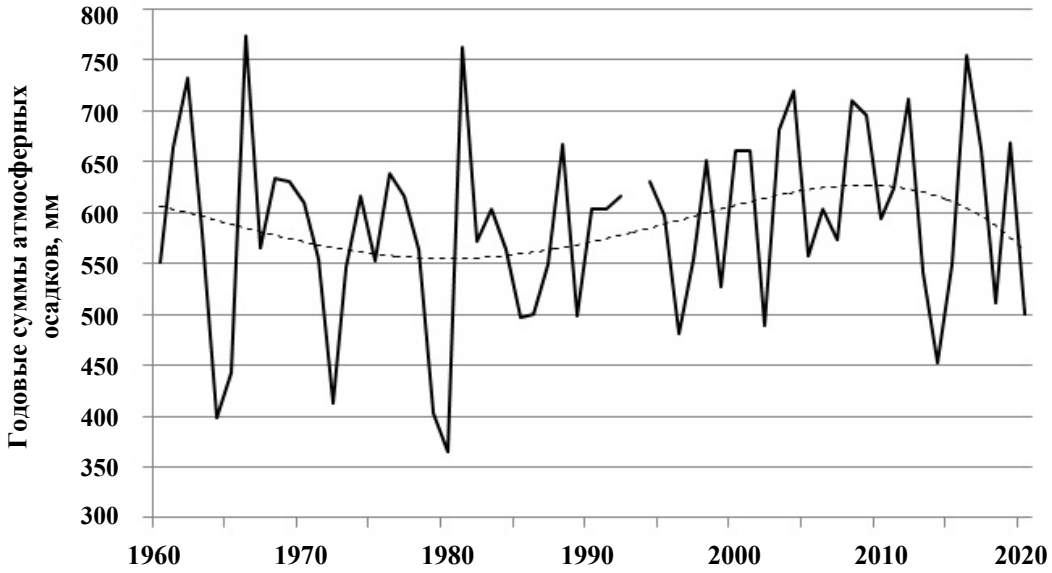



**Рис. 1.** Годовые суммы атмосферных осадков по данным наблюдений, МС Петрозаводск

**Fig. 1.** Annual precipitation amounts according to observations, Petrozavodsk WS

Внутри года осадки распределены неравномерно – их количество за теплый период (май – октябрь) колеблется от 350 до 400 мм, за холодный – от 150 до 350 мм. Максимум количества осадков на большей части республики приходится на июль – август, иногда на сентябрь. Жидкие осадки отмечаются в каждом месяце и составляют 60–65 % от годовой суммы, твердые осадки – 24–25 %, смешанные – 10–15 % годовых. Твердые атмосферные осадки – это осадки, выпадающие из облаков в виде снега, крупы, снежных зерен, ледяного дождя или града. Именно их количество измеряют на метеорологических станциях. Кроме этого, существуют и твердые формы наземных гидрометеоров, таких, как иней, изморозь, гололед. Жидкие осадки могут выпадать из облаков (дождь, морось), из тумана (морось) и выделяться из воздуха на наземных предметах или на поверхности земли (роса). К смешанным осадкам относятся мокрый снег и дождь со снегом.

При сравнении климатических норм 1961–1990 и 1991–2020 гг. (рис. 2) можно сделать вывод о значительном увеличении средних месячных значений сумм атмосферных осадков в период с октября по февраль и с мая по июль, в то время как для марта – апреля и сентября отмечается снижение величин указанной характеристики. При этом уменьшается доля твердых осадков и растет доля смешанных атмосферных осадков.

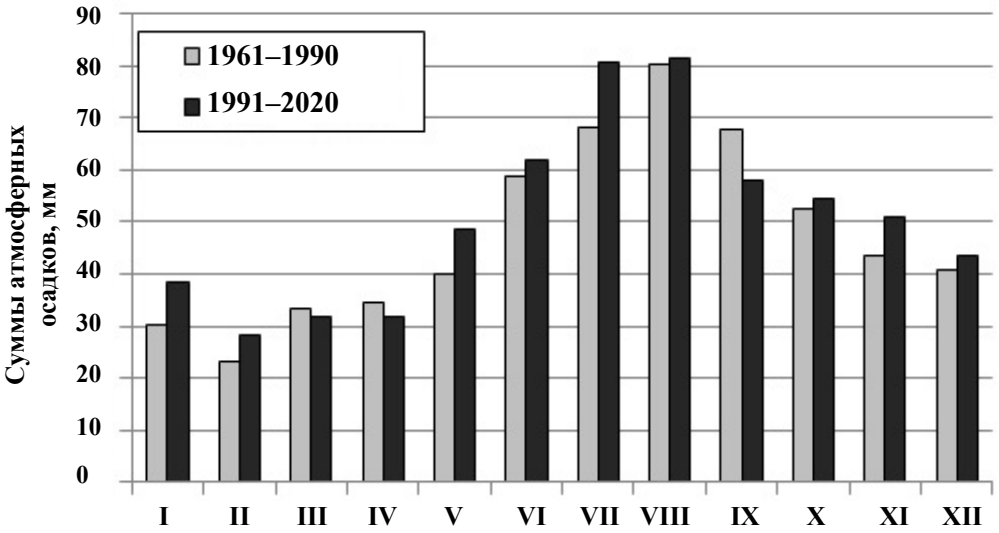



**Рис. 2.** Климатические нормы сумм атмосферных осадков по месяцам за 1961–1990 и 1991–2020 гг., МС Петрозаводск

**Fig. 2.** Monthly climate normals for relative humidity for 1961–1990 and 1991–2020, Petrozavodsk WS

Относительная влажность воздуха изменяется от зимы к лету в среднем от 90 до 50 %. Число дней с влажностью в течение суток более 80 % составляет в среднем 150–170 дней, с влажностью менее 30 % – всего 3–9 дней. Наиболее высокая относительная влажность воздуха наблюдается в холодный период, с ноября по январь (более 85 %), наименьшая – в мае – июне, но и тогда среднее значение на суше не опускается ниже 50–55 %; в этот же период относительная влажность у водоемов достигает 60 % (на островах – до 70 %), ночью – до 80 %. Средние многолетние величины относительной влажности воздуха по месяцам довольно устойчивы. По данным МС Петрозаводск, значения за два последовательных стандартных периода осреднения практически не изменились (рис. 3). Небольшое повышение характерно для холодного периода года, что связано с ростом температуры воздуха и увеличением повторяемости оттепелей в зимние месяцы.

Карелия расположена в зоне относительно малого испарения, которое обусловлено значительной облачностью и невысокими летними температурами. На испарение затрачивается 50–60 % атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосборов. Годовая величина испаряемой влаги с поверхности почв уменьшается с юга на север от 420 до 310 мм.

Над территорией республики преобладающими в течение года являются ветры южного, юго-западного и западного направлений, за исключением тех районов, где под влиянием особенностей рельефа ветровое поле искажается.

На климат многих районов Карелии заметное влияние оказывают сельги и другие грядовые образования. В районе г. Кондопоги наибольшей повторяемостью отличаются ветры северного и юго-восточного направлений, что вызвано влиянием цепи холмов, ориентированных с северо-запада на юго-восток. Именно всхолмления, защищающие северное побережье Ладожского озера от северных ветров, позволяют господствовать здесь ветрам южной четверти. Особенности рельефа и влияние Ладожского озера привели к образованию в районе г. Сортавалы микроклимата, отличного от климата соседних районов Карелии. Это наиболее теплый район республики, средняя годовая температура воздуха здесь выше 3 ºС. Устойчивость и величина скорости ветров зависят от времени года. В холодный период благодаря большим горизонтальным градиентам давления

ветры наиболее устойчивы по направлению и наибольшие по силе (3–4 м/с). На открытых побережьях крупных водоемов среднемесячные скорости ветра составляют 4–5 м/с, на островах Ладожского и Онежского озер достигают 7–8 м/с. В летнее время скорости ветров уменьшаются до 2,5–3,5 м/с в среднем по территории республики и до 4–5 м/с на островах. В различные годы метеорологические станции Карелии фиксировали усиления скорости ветра до 25–30 м/с, порывы до 40 м/с. Суточный ход скорости ветра наиболее выражен в теплое время года, особенно с мая по август. Наибольшие скорости отмечаются в дневные часы.

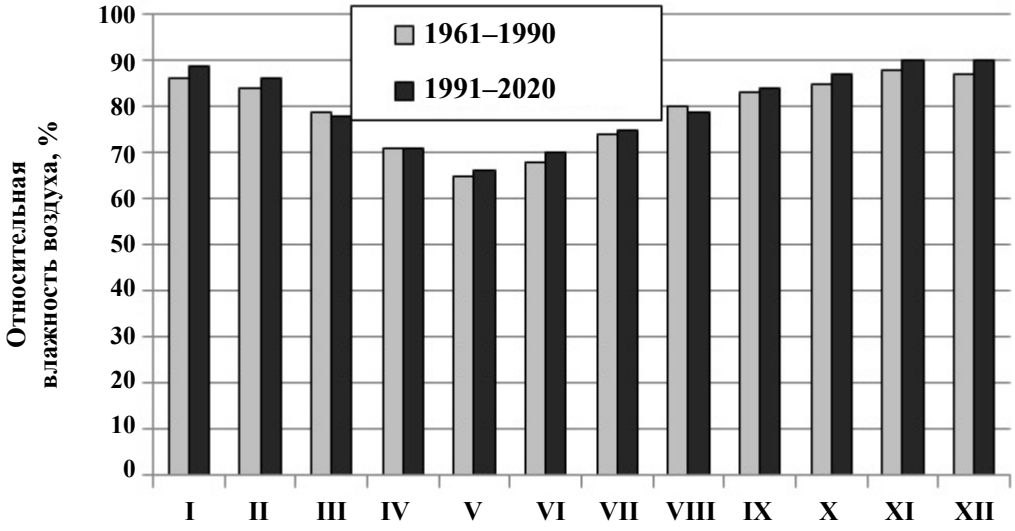



**Рис. 3.** Климатические нормы относительной влажности воздуха по месяцам за 1961–1990 и 1991–2020 гг., МС Петрозаводск

**Fig. 3.** Monthly climate normals for relative humidity for 1961–1990 and 1991–2020, Petrozavodsk WS

Такие крупные водоемы, как Ладожское и Онежское озера, способны создавать местную циркуляцию, которая, проявляясь в прибрежной зоне, вызывает частую смену направлений ветра. В летнее время вследствие неравномерного суточного нагревания воды и суши над озерами образуются бризовые ветры. Они наблюдаются в береговой зоне открытого плеса, в заливах и губах. Над Онежским озером бризы распространяются на расстояние на 3–10 км в озеро и до 20 км в глубь побережья.

В любые сезоны года для климатических условий Карелии характерна частая смена воздушных масс. Интенсивная циклоническая деятельность, относительно быстрая смена синоптических процессов обусловливают значительную изменчивость, порой даже в течение суток, значений метеорологических элементов и параметров. Так, именно прохождение глубокого ныряющего циклона вызвало повышение температуры воздуха в Петрозаводске с 7 часов 31 января до 7 часов 1 февраля 1956 г. на 28,2 ºС. Прохождением циклона было обусловлено и падение атмосферного давления 8 января 1973 г. на 38,3 гПа за сутки.

Интенсивная циклоническая деятельность приводит к развитию значительной облачности во все сезоны года. Среднегодовые величины общей облачности для Карелии – 7–8 баллов (по десятибалльной шкале). По данным И. В. Молчанова [1945], наименьшей по сравнению с другими районами облачностью отличается Ладожское озеро. Среднегодовые значения общей облачности над Ладогой и прилегающими территориями составляют около четырех баллов. Вероятность пасмурного состояния неба в летнее время равна 46–50 %, в весеннее и осеннее – 65 %, в зимнее – 80 %. Наибольшие значения количества облачности для территории Карелии в целом наблюдаются в осенние месяцы с максимумом в ноябре (8,8–9,2 балла общей облачности). Повторяемость пасмурного состояния неба (8–10 баллов по общей облачности) в этот период составляет 83–88 %. К марту количество облачности заметно убывает, а в период с марта по июль не превышает 6,5 балла. Преобладание пасмурного состояния неба приводит к уменьшению продолжительности солнечного сияния в Карелии до 34–37 % от возможного (в Ленинградской, Новгородской и Псковской областях – 41–45 %). В районе г. Петрозаводска теоретически возможное число часов

с солнцем составляет 4530 за год. Но вследствие часто повторяющегося пасмурного состояния неба действительная продолжительность солнечного сияния значительно уменьшается, до 1674 часов за год, что составляет 37 % от возможного. По данным ГМС Сортавала [Климат Сортавалы, 1988], с увеличением облачности на 1 балл суммарная радиация уменьшается на 15 % в январе – марте, на 13–20 % в сентябре – ноябре, на 17 % в июне – июле и на 9 % в апреле, августе и декабре. В среднем за год с увеличением облачности на 1 балл величина суммарной радиации уменьшается на 15 %.

На территории Карелии продолжительность солнечного сияния распределяется довольно равномерно, постепенно увеличиваясь с севера (п. Лоухи – 1560 часов в среднем за год) на юг (г. Сортавала – 1749). В отдельные годы для одного и того же пункта наблюдений продолжительность солнечного сияния может значительно отличаться от значений климатических норм. По данным наблюдений на МС Петрозаводск, был построен график многолетней динамики годовых сумм продолжительности солнечного сияния (рис. 4). Как можно видеть, однонаправленной тенденции изменений нет, можно говорить о наличии квазипериодических колебаний. Квазипериодическим процессом называют колебания, проявляющиеся с приблизительно регулярными интервалами.

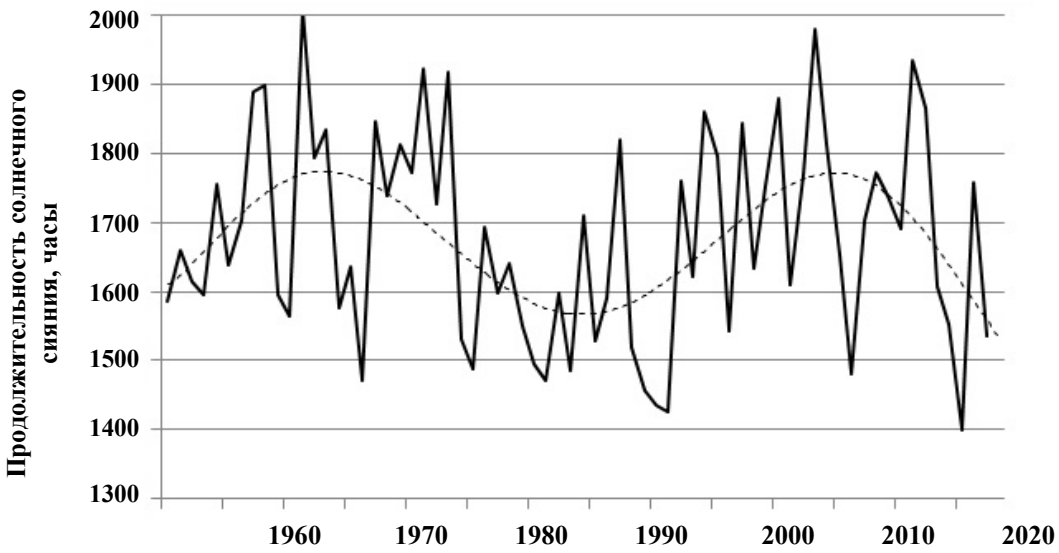



**Рис. 4.** Продолжительность солнечного сияния, суммы за год, часы, МС Петрозаводск

**Fig. 4.** Total annual sunshine hours, Petrozavodsk WS

На побережьях крупных водоемов число часов с солнцем несколько увеличивается. Это обусловлено уменьшением количества облачности в теплое время года над районами, непосредственно прилегающими к Ладожскому и Онежскому озерам. Продолжительность солнечного сияния имеет хорошо выраженный годовой ход. Максимум часов с солнечным сиянием за месяц приходится на июль на севере республики (280–290 часов), на юге – на июнь (290–300 часов). Минимальное число часов солнечного сияния отмечается в декабре (0–14 часов). В отдельные годы вследствие изменчивости циркуляционных процессов в атмосфере могут наблюдаться значительные отклонения от средних многолетних значений продолжительности солнечного сияния. Так, для Петрозаводска в декабре 1984 г. был отмечен абсолютный минимум продолжительности солнечного сияния – за месяц солнце наблюдалось в течение 42 минут при норме 8,3 часа, абсолютный максимум часов с солнцем за месяц для г. Петрозаводска составляет 407 часов (май 1978 г., норма – 294,5 часа). Число дней без солнца в Карелии – 120–130 дней за год, на севере республики – 140 дней (для сравнения, в г. Павловске под Санкт-Петербургом – 111 дней за год, в г. Бресте – 93, в г. Омске – 57). В период с ноября по январь пасмурная погода в Карелии является преобладающей. В северной Карелии в этот период солнечное сияние практически отсутствует, число дней без солнца составляет 27–31 день за месяц. В южных районах республики солнце не появляется в течение 20–25 дней за месяц. Значительно реже дни без солнца отмечаются в весенний и летний сезоны. Наименьшее число дней без солнца приходится на июнь, в среднем 1 день за месяц.

Средняя годовая температура воздуха на территории Карелии изменяется от 0 ºС на севере до 4 ºС на юге. Самый холодный месяц – январь (–12–13 ºС в северной части, –8–10 ºС – в южной). Вблизи крупных водоемов и на островах Ладожского и Онежского озер февраль холоднее января в среднем на 0,2–0,5 ºС. Абсолютный минимум температуры воздуха для Карелии был зафиксирован в январе 1940 г. в Олонце и составил –54 ºС.

Самым теплым месяцем является июль (14–15 ºС на севере и 16–17 ºС на всей остальной территории республики). Абсолютный максимум температуры воздуха составил 36 ºС (июль 1972 г. Пудож и июль 2010 г. Олонец).

В Петрозаводске средняя годовая температура воздуха составляла, по данным наблюдений в 1961–1990 гг., 2,5 ºС, по новым климатическим нормам 1991–2020 гг. – 3,6 ºС. Рост средней годовой температуры воздуха по всей территории Карелии отмечается с 1989–1990 гг. (рис. 5).

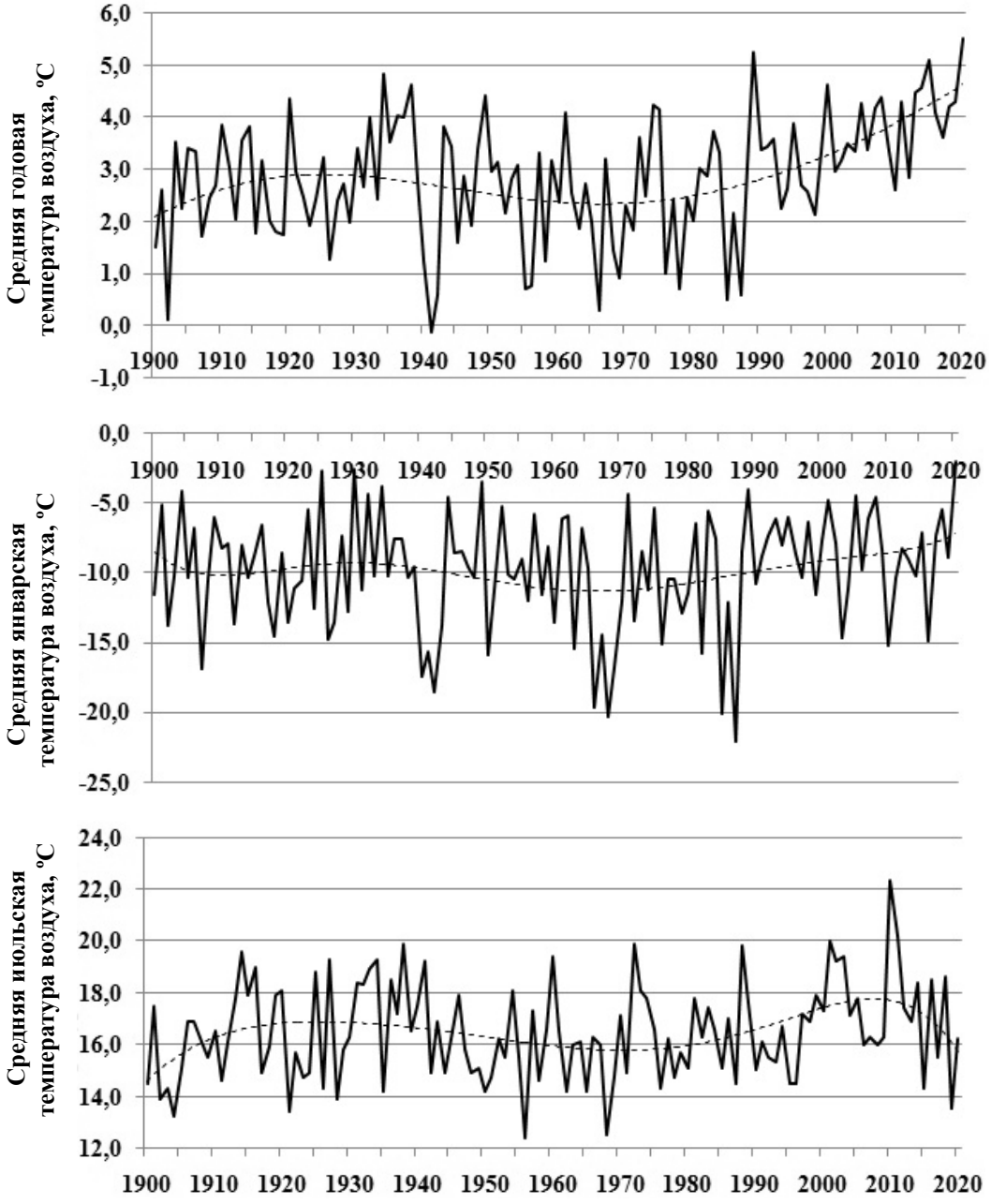



**Рис. 5.** Средняя годовая январская и июльская температура воздуха, МС Петрозаводск

**Fig. 5.** Mean annual, January and July air temperatures, Petrozavodsk WS

Климатическая норма температуры воздуха в январе изменилась от –11,4 ºС (1961–1990) до –8,4 ºС (1991–2020). Изменения величины средней месячной температуры в июле составили от 16,1 ºС до 17,1 ºС.

Переход средней суточной температуры воздуха через ноль в сторону повышения (наступление весны) происходит на севере в конце апреля, на юге – 10–15 апреля. Период с положительными средними суточными температурами составляет соответственно 175–190 и 190–200 дней. Весна характеризуется частыми возвратами холодов, а иногда и кратковременным установлением снежного покрова. В среднем к концу апреля вся территория освобождается от снега. Но в некоторые годы в северных районах снежный покров может сохраняться до третьей декады мая.

Лето (устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через 10 ºС) наступает в конце мая на юге и в середине июня на севере республики. Средняя продолжительность летнего сезона 2,5–3,5 месяца. Летний сезон в Карелии короткий и относительно прохладный. Устойчивый период времени со среднесуточной температурой воздуха выше 15 ºС по северу Карелии бывает только в теплые годы (обеспеченность менее 50 %), в центральной и южной Карелии этот период составляет от 30 до 50 дней. В конце августа – первой половине сентября повсеместно отмечаются заморозки. Безморозный период по республике составляет 80–130 дней, на островах Ладожского озера (Валаам) – 150 дней в году.

Осень наступает на севере в конце августа, на юге – в конце первой – начале второй декады сентября и продолжается около двух месяцев. Осенние месяцы, как правило, теплее весенних. Сентябрь теплее мая, а октябрь – апреля в среднем на 2–3 ºС.

Зима в Карелии продолжительна. Начало зимнего сезона (устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через –5 ºС в сторону понижения) совпадает со средней датой образования устойчивого снежного покрова. Период со среднесуточной температурой воздуха ниже –5 ºС составляет 125–135 дней на севере и 115–125 дней на юге, а ниже –10 ºС – соответственно 70–80 и 50–60 дней. Устойчивого периода времени с температурой воздуха ниже –15 ºС не наблюдается. В зимний период часто могут наблюдаться оттепели до +2 ...+5 ºС, которые нередко сменяются резкими похолоданиями, когда минимальная температура воздуха может достигать –30 ºС. Переход температуры через –5 ºС осуществляется в середине ноября в северных и в конце ноября в южных районах. Обратный переход – в последние числа марта на севере и 20–25 марта – на юге Карелии.

Несколько иные сроки наступления сезонов года отмечаются на островах Ладожского озера, в частности на островах Валаамского архипелага. Медленно нагреваясь и медленно остывая, Ладога на две недели задерживает смену времен года на островах по сравнению с южным побережьем. Безморозный период на Валааме длится на месяц дольше, чем в г. Петрозаводске.

## Вопросы для самоконтроля

1. Изучением каких вопросов занимается наука метеорология?
2. Чем отличается погода от климата?
3. Какие климатообразующие факторы влияют на формирование климата Карелии?
4. Где на территории Карелии выпадает наименьшее количество атмосферных осадков?
5. Ветры какого направления являются господствующими на территории Карелии?

## Литература

*Алисов Б. П.* Климат СССР. М.: МГУ, 1957. 211 с.

*Будыко М. И.* Климат в прошлом и будущем. Л., 1980. 350 с.

*Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В., Раевский А. Н., Смекалова Л. К., Школьный Е. П.* Климатология. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 568 с.

Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 55–63.

Климат Сортавалы / под ред. Ц. А. Швер и Л. С. Раковой. Л., 1988. 117 с.

Климат Петрозаводска / под ред. Ц. А. Швер. Л., 1982. 212 с.

*Молчанов И. В.* Ладожское озеро. Л.: Гидрометеоиздат, 1945. 556 с.

*Назарова Л. Е.* Климат: определение, понятия, основные компоненты / Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 37–40.

*Назарова Л. Е.* Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Известия Русского географического общества. 2014. Т. 146, вып. 4. С. 27–33.

*Романов А. А.* О климате Карелии. Петрозаводск, 1961. 139 с.

*Хромов С. П., Мамонтова Л. И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 567 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Назарова Лариса Евгеньевна**
директор ИВПС КарНЦ РАН, к.г.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: larisanazarov@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

**Nazarova, Larisa**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030,
Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: larisanazarov@yandex.ru

УДК 910.1

# ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ СУШИ. ГИДРОНИМЫ И СПОСОБЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

**Р. Ф. Антонова**, **И. В. Щеколдина**

*Петрозаводский государственный университет, Россия*

**Аннотация.** Представлена отраслевая структура гидрологии. Раскрываются понятия «географическая номенклатура» (топонимия) и «гидронимы», нормы наименования и способы картографического изображения водных географических объектов. Подчеркивается важность изучения гидрологических объектов с точки зрения общекультурного и нравственного императива. Даются рекомендации по изучению географической номенклатуры.

**Ключевые слова:** география; гидрология; географическая номенклатура (топонимия); водные ресурсы; гидронимы.

# INLAND WATERS. METHODS OF STUDYING HYDRONYMS

**R. F. Antonova, I. V. Shchekoldina**

*Petrozavodsk State University, Russia*

**Summary.** The lecture described the sectoral structure of hydrology. We explain the concept of geographic nomenclature (toponymy), naming conventions, and ways of mapping water objects. The lecture introduces the concept of "hydronyms", and gives recommendations for studying the geographic nomenclature. The study of hydrological objects is important from the general cultural and moral perspectives.

**Keywords:** geography; hydrology; geographic nomenclature (toponymy); water resources; hydronyms.

**Тема лекции.** «Водные объекты суши. Гидронимы и способы их изучения».

**Цель.** Актуализация знаний о водных объектах гидросферы суши и их наименованиях.

**Задачи.** Образовательная задача: углубление представления о водах суши и их роли в природе. Личностная задача: формирование понимания значимости знаний о водных объектах в практической жизни людей; осознание необходимости распознавания объектов на карте. Познавательная задача: формирование интереса к исследовательской деятельности. Коммуникативная задача: выстраивание позитивных отношений в процессе учебной и познавательной деятельности, соблюдение норм письменной, устной речи при наименовании объектов и гидронимов. Предметная задача: усвоение понятий, знание гидрографической номенклатуры, умение правильно показывать и называть объекты на географической карте, объяснять причинно-следственные связи, определять экологические угрозы и риски и возможности сохранения водных ресурсов. Метапредметная задача: оперирование гидрологическими понятиями и терминами.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Гидрология и ее отраслевая структура.
2. Географическая номенклатура (топонимия).
3. Гидронимы. Классификация гидронимов.
4. Картографическое изображение водных объектов.
5. Нормализации географических наименований.
6. Рекомендации по изучению географической номенклатуры водных объектов.

Заключение.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** Подготовлены презентации «Разнообразие водных объектов суши», «Гидронимы», «Воды суши», «Номенклатура». В презентациях приведена классификация водных объектов гидросферы Земли, представлена их краткая характеристика, раскрывается сущность понятия «гидроним», дается классификация и приводятся примеры гидронимов для разных материков. Презентации «Воды суши» и «Номенклатура» содержат ответы и пояснения к изучению терминов и географической номенклатуры гидрологических объектов.

## Изложение материала

**Введение.** География – важнейший фактор формирования естественнонаучной картины мира. На современном этапе она играет ключевую роль в объяснении современных экономических, социальных, культурных и политических процессов в меняющемся мире. Географические знания, с одной стороны, – это ключ к пониманию многогранности и неоднозначности планетарных проблем, с другой – важнейший критерий уровня культуры человека. Названия географических объектов – это язык географии, с помощью которого передается первичная информация о пространстве. Знакомство с любой территорией или картой начинается с изучения географической номенклатуры – совокупности названий природных, политических и хозяйственных объектов. Человек, изучивший номенклатуру, имеет два неоспоримых преимущества – возможность свободно ориентироваться по картам и представлять структуру окружающего пространства (географической оболочки). В географических названиях хранится богатейшая информация. Междисциплинарная отрасль знания, занимающаяся изучением происхождения географических названий, их смысловым значением, произношением и т. д., использующая принципы и методы географии, называется топонимикой. Многие исторические факты и современные события общественной жизни воспринимаются нами через призму географических названий. Свободное владение географической номенклатурой характеризует высокий уровень знаний студентов разных профилей подготовки.

**1. Гидрология и ее отраслевая структура.** Современная гидрологическая наука рассматривает водные объекты как звенья единой гидрографической сети, включающей речную сеть, реки, ручьи, озера, что не противоречит «Водному кодексу Российской Федерации» от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.12.2020) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021), где под водными ресурсами следует понимать поверхностные и подземные воды, которые находятся в водных объектах и используются или могут быть использованы, а водный объект – природный или искусственный водоем, водоток либо иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод в котором имеет характерные формы и признаки водного режима. Гидрологические объекты составляют практически половину всех изучаемых географических объектов.

Гидрология – это наука, изучающая природные воды и происходящие в них явления и процессы. Гидрология подразделяется на общую гидрологию и другие разделы (гидрография, гидрометрия, гидрофизика, гидрохимия, инженерная гидрология). В общую гидрологию входят океанология (гидрология океанов и морей), гидрология подземных вод (почти то же, что гидрогеология) и гидрология водных объектов суши – гидрология рек, озер, водохранилищ, болот, ледников (почти то же, что гляциология). При изучении водных объектов важны не только знания гидрологических объектов, но также их география (географическое положение) и топонимия. Объекты гидрологии являются составной частью географической номенклатуры.

**2. Географическая номенклатура (топонимия).** Географическая номенклатура (топонимия) – неотъемлемая часть курсов общего землеведения, физической географии материков и океанов, физической географии России и отдельных ее регионов. Под географической номенклатурой понимается совокупность (перечень) названий географических объектов, в том числе и гидрографических: океанов и их частей, а также гидросферы суши. Географические названия (топонимы) используются при изложении материала для пространственной привязки природных явлений, приводятся в качестве примеров, освещающих географические закономерности, и рассматриваются как самостоятельные понятия.

Среди топонимов выделяются различные классы, такие, как: оронимы (названия поднятых форм рельефа), гидронимы (названия водных объектов), ойконимы (названия населенных мест), астионимы (названия городов) и др. Известна воспитательная и познавательная роль топонимов. Многие исторические факты и современные события общественной жизни воспринимаются нами через географические названия. Свободное владение географической номенклатурой характеризует высокий уровень квалификации будущего учителя географии. В составе номенклатуры есть большое количество физико-географических названий, связанных с областью искусства, культуры, политики, необходимых для общего образования студента.

Русская и зарубежная литература знакомит нас со многими географическими названиями. Поэтому топоним о. Цусима невольно связывается с названием исторического романа А. Новикова-Прибоя «Цусима», а название одной из рек Испании – Гвадалквивир – со знаменитым стихотворением А. С. Пушкина «Шумит, бежит Гвадалквивир...». Гора Броккен в Гарце, где был устроен «шабаш ведьм в Вальпургиеву ночь», ассоциируется с поэмой И. Гете «Фауст». Небольшая река Клондайк на Аляске известна прежде всего по рассказам Джека Лондона. Ее топоним стал нарицательным словом, обозначающим «золотую лихорадку». К числу названий физико-географических объектов, ставших местом исторических или современных политических событий, относятся река Халхин-Гол, Синайский полуостров, остров Окинава, остров Гренада и др. [Рассказова, 2009]. «О, Волга!.. колыбель моя! Любил ли кто тебя, как я?» – восклицаем мы вслед за Н. А. Некрасовым и пытаемся мысленно прочертить путь великой русской реки с ее излучинами (Самарская Лука), дельтой, плесами, стреженями. С некоторыми объектами знакомство происходило еще в раннем детстве – благодаря песенной культуре, а истинный смысл становится понятен только при изучении терминов. Вольные казаки Степана Разина, разгромив персидский флот у «Свинова» острова в Каспийском море (1669), возвращаются с трофеями на Волгу. И мы будто прослеживаем их путь, в памяти каждого живут стихи Д. Н. Садовникова: «Из-за острова на стрежень, на простор речной волны...». Песня столь популярна, что считается уже народной. Споры о том, какой именно остров казаки называли «Свиным», идут до сих пор, возможно, что остров Сари.

Известны и широко распространены случаи, когда термины в общепринятом понимании становятся топонимами. Это относится и к городу Плёс. В сегодняшнем языке плёс – это глубокая и широкая часть реки между изгибами или перекатами со спокойным течением. Многие авторы считают, что этот термин в основе своей несет старославянское «плёс» или «плесо», обозначающее «озеро». По отношению к реке это вторичное обозначение. Ровное и тихое течение, большая глубина соответствуют характеристике Волги в данном месте, издавна заселенном русскими. Благодаря этим особенностям город и получил такое название.

В основу многих оронимов, ойконимов, астионимов положены названия водных объектов. Это известные формы рельефа России – Прикаспийская, Прибеломорская, Колымская, Вилюйская, Кумо-Манычская низменности, Зейско-Буреинская, Амуро-Сунгарийская, Васюганская равнины, Приволжская, Верхнекамская, Нижнеенисейская возвышенности и др. Длинный перечень составляют названия населенных пунктов, совпадающих по географическому положению с водными объектами, – Вятка, Кострома, Воронеж, Самара, Уфа, Надым, Уссурийск, Анадырь, Печора, Онега, Волхов, Кемь, Суоярви, Шуя и др. Названия многих особо охраняемых природных территорий России включают гидронимы – заповедники (Волго-Камский, Катунский, Байкало-Ленский, Ханкайский), национальные парки (Паанаярви, Кенозерский, Плещеево озеро, Нижняя Кама, Зюраткуль, Прибайкальский и др.).

**3. Гидронимы. Классификация гидронимов.** В соответствии с объектами гидрологии формируются и гидронимы. Гидронимы – понятие, относящееся к классу топонимов. В топонимике есть самостоятельный раздел, занимающийся их изучением – гидронимика. «Гидроним» – слово греческого происхождения, состоящее из двух частей – «вода» и «имя». Под гидронимом принято понимать собственное имя водного географического объекта: водоема (море, озеро, пруд), потока (река, ручей) или его части (залив, плёс). Гидронимы классифицируются на пелагонимы (названия морей), лимнонимы (названия озер), потамонимы (названия рек), гелонимы (названия болот, заболоченных мест).

Гидронимы такой физико-географической страны, как Фенноскандия, расположенной на северо-западе Европейского субконтинента, в списке номенклатуры занимают первые позиции. Это связано с яркой выраженностью и особенностями гидрографической сети, обусловленными геоморфологическим строением и историей геологического развития этого региона. Фенноскандия – «страна тысячи рек и озер». Лимнонимы в чередовании с потамонимами отражают структуру озерно-речной сети региона. Река Шуя бассейна Балтийского моря соединяет озера Суоярви, Шотозеро, Вагатозеро, Логмозеро с Онежским озером, вторым по площади озером Европы. Озеро Паанаярви, расположенное в пределах одноименного национального парка (Лоухский район Республики Карелия) принимает воды порожистых рек Оуланкайоки, Совайоки, Мянтюйоки, Муткайоки, Селькяйоки и соединяется рекой Оланга с озером Пяозеро, а далее имеет сток в Белое море. Гидронимы Фенноскандии, как и другие группы топонимов, отражают разные исторические эпохи, связанные с жизнедеятельностью финно-угорского и русского населения.

Часто гидронимы предстают в литературных произведениях как реальные географические пространства, несут в себе символические образы конкретных территорий, на их фоне разворачивается сюжет произведения, они отражают внутренние переживания героев.

С гидронимами связано формирование самых древних «речных цивилизаций»: в бассейне Нила возникла древнеегипетская цивилизация, на берегах Тигра и Евфрата – шумерская, вокруг Инда и Ганга – индийская, рядом с Хуанхэ и Янцзы – китайская. По закономерности все они возникли в долинах крупных рек, в связи с исключительной важностью земледелия, рыбных и других промыслов, передвижения, обороны для местных народов. Использование гидронимов в мировой военной и политической культуре уходит корнями в далекое прошлое. История изобилует известными речными (озерными) сражениями: битва на Калке реке (1223), Невская битва (1240), Ледовое побоище (битва на Чудском озере, 1242). В наше время стал широко популярен международный политический дискуссионный клуб «Валдай». Своим названием клуб обязан одноименному озеру. По утверждению Э. М. Мурзаева (2001): «... из всех топонимических образований наиболее устойчивыми оказались речные имена».

**4. Картографическое изображение водных объектов.** Среди средств обучения географии одно из ведущих мест занимают карты. «География и географическая карта связаны между собой неразрывно. Едва ли будет преувеличением, если мы скажем, что без карты нет и не может быть географии» [Половинкин, 1952]. Как известно, воды суши и береговая линия морей всегда составляли непременную часть содержания географических карт. Морские берега, реки и озера служат на картах ориентирами (наряду с картографической сеткой) для установления местоположения населенных пунктов и других географических объектов. На многих общегеографических картах отмечают положение морских путей сообщения, на некоторых – океанические течения, а также показывают области распространения постоянных или плавучих льдов.

Освоение географических дисциплин невозможно без знания географической карты, которую географ должен свободно читать и понимать. Работа с картой требует некоторых навыков. Прежде всего необходимо вспомнить, как на физической карте изображаются объекты. Для этого следует обратиться к условным обозначениям, которые есть на любой карте. Необходимо безошибочно различать на карте изображения гор, возвышенностей, равнин и низменностей, относительную глубину Мирового океана. В этом поможет шкала глубин и высот. Ступени глубин между изобатами при гипсометрическом способе изображения окрашивают в синий цвет по принципу: чем глубже ступень, тем окраска интенсивнее. На картах помещают отметки глубин, дополняющие гипсометрический способ изображения. Особое внимание уделяется изображению береговой линии моря (например, многие морские берега служат естественными границами государств). Речные системы крупных рек охватывают большие площади. Главную реку системы обычно выделяют несколько большей толщиной линейного условного знака. Озера на картах могут изображаться по-разному, в зависимости от величины, солености и других характеристик. Особый условный знак имеется и для обозначения заболоченных участков и других гидрологических объектов.

После изучения способов картографического изображения гидрологических объектов следует переходить к определению их местоположения и к запоминанию. Этот процесс невозможен

без понимания и знания географической номенклатуры. Программа по географии предусматривает изучение нормативных географических названий, необходимых для формирования географических понятий и развития общего культурного уровня студентов. Во всем мире особое внимание обращается на нормализацию наименований, т. е. выбор наиболее распространенных названий и определение их написания на том языке, на котором они употребляются. В нашей стране нормализация проводится в соответствии с правилами и традициями русского языка и других языков народов России. В словарях, справочниках и каталогах, на картах и в атласах должны публиковаться только нормализованные наименования географических объектов.

**5. Нормализации географических наименований.** Проблемами нормализации географических наименований обычно занимаются специальные государственные и международные органы. При Организации Объединенных Наций существует специальная Группа экспертов по географическим названиям. ООН регулярно проводит всемирные и региональные конференции по этой тематике – всё это свидетельствует о важности и постоянной актуальности проблемы нормализации географических названий. В России нормализация географических наименований является задачей специализированного подразделения Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского (ЦНИИГАиК). В нем разрабатываются инструкции по нормализации наименований, публикуются руководства, нормативные словари, списки переименований. Принят особый федеральный закон, который создал правовую базу для наименования и переименования географических объектов. Закон и принимаемые на его основе нормативные правовые акты (нормы, правила, инструкции, руководства) определяют, кроме того, порядок регистрации, учета и сохранения наименований. Закон устанавливает, что наименование, присваиваемое географическому объекту, должно отражать его характерные признаки, особенности жизни и деятельности населения на данной территории и к тому же вписываться в существующую систему топонимов. Новые названия географических объектов, взамен устаревших или ошибочных, вводит на справочные карты зарубежных стран и карты материков Главное управление геодезии и картографии. Они становятся обязательными для всех ведомств и организаций нашей страны. Почти все справочные карты никаких пояснений к изменению географической номенклатуры по сравнению с предыдущим изданием не дают. Исключение составляют некоторые выпуски Атласа мира, обновляемые в среднем каждые два года. Но справочный материал в них обесценивается несоответствием ссылок с картами. Отсутствие справочного материала об изменении номенклатуры не позволяет отличить ошибочное искажение топонима, иногда встречаемое на картах, от его нового написания.

При изучении номенклатуры по курсам физической географии необходимо учитывать все имеющиеся и возможные изменения на физической карте мира, своевременно вводить их в учебный процесс, не пользоваться устаревшими географическими названиями, осваивать нормативное написание и произношение топонимов. Правильное произношение географических названий является обязательным не только для дикторов радио и телевидения, но и учителей географии. К сожалению, все учебные географические атласы не дают представления о произношении топонимов, так как в указателе географических названий не поставлены ударения.

Некоторые географические объекты имеют несколько названий. Об основных причинах многоименности подробно написано во Введении к учебному пособию «Географическая номенклатура», выпущенному географами в 2007, 2015, 2019 гг. Предлагаемая для изучения в университете географическая номенклатура (топонимия) выверена по картографическим источникам и обеспечивает студентов информацией о нормативном написании географических названий (топонимов) и их произношении, которое зафиксировано постановкой ударений.

**6. Рекомендации по изучению географической номенклатуры водных объектов.** При изучении географической номенклатуры студентам необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

1. Изучение географической карты должно осуществляться в соответствии с теоретическим курсом, поэтому при слушании лекции или при работе с учебником необходимо акцентировать внимание на упоминаемых географических объектах (в тексте лекции – подчеркнуть, выделить другим цветом, выписать на поля и т. п.).

2. При изучении географической номенклатуры необходимо пользоваться географическими атласами и настенными картами, чтобы находить географические объекты на картах разных масштабов.

3. Лучшему запоминанию географической номенклатуры способствует знание происхождения названия (топонима). Познакомиться с происхождением названий географических объектов можно в топонимическом словаре Е. М. Поспелова «Географические названия мира» (2002) и в других изданиях.

4. При отчете по карте необходимо правильно показывать географические объекты: материки, океаны, моря, заливы, острова, равнины – по контуру; линейные – по направлению протяженности; реки – от истока к устью и т. д.

Для проверки знания географической номенклатуры могут использоваться специализированные письменные задания, географические диктанты с использованием контурных карт, а также отдельные тесты (вопросы) в практических и контрольных работах по соответствующим дисциплинам.

**Заключение.** Географическая номенклатура водных объектов (гидронимия) в пособии для студентов структурирована по материкам и представлена в двух разделах: береговая линия (моря, заливы, проливы, острова, полуострова, мысы) и гидрография (реки, озера). Гидронимию изучают студенты 1–4 курсов в разделах учебных дисциплин «Общее землеведение», «Физическая география материков», «География океанов», «Физическая география России», «География Европейского Севера», «География Карелии». Выше изложенные рекомендации помогут студентам освоить этот раздел учебной топонимии. Базовое понимание и знание номенклатуры по дисциплине «Общее землеведение» помогут при запоминании региональных особенностей гидрографической сети материков и отдельных районов ранга ландшафтных стран, областей, отдельных государств.

Географическая номенклатура является основой для формирования знаний по социально-экономическим и страноведческим дисциплинам, поэтому в качестве самостоятельной работы рекомендуется определить, на территории какой страны или экономического района расположен тот или иной водный объект. Здесь используется прием сопоставления физико-географических и политико-административных карт.

П о н я т и я . Гелонимы, географическая номенклатура (топонимия), гидрология, гидронимика, гидронимы, гидросфера, изобаты, лимнонимы, пелагонимы, потамонимы, топонимика, топонимы.

П е р с о н а л и и . Феодосий Николаевич Красовский, советский астроном-геодезист, член-корреспондент АН СССР (1939). Под его руководством были определены размеры земного референц-эллипсоида (эллипсоид Красовского).

Эдуард Макарович Мурзаев, ученый-географ, топонимист и историк географии. Доктор географических наук (1949), профессор (1956), Заслуженный деятель науки РСФСР (1970).

## Задания

Задания по гидронимии России (гидрографическая номенклатура).

1. Приведите примеры рек (до 5 названий) для территории России, относящиеся к:
   1) бассейну Тихого океана;
   2) бассейну Северного Ледовитого океана;
   3) бассейну Атлантического океана;
   4) бассейну внутреннего стока.
2. Приведите примеры рек, истоки которых находятся в Уральских горах (до 5 названий).
3. Приведите примеры рек, являющихся притоками реки Волга (до 5 названий).
4. Приведите примеры левых притоков реки Амур (до 3 названий).
5. Приведите примеры озер Восточно-Европейской равнины (до 5 названий).

6. Вспомните и приведите примеры поэтических строк или литературных произведений, связанных с гидронимами. Вспомните и приведите примеры, когда гидрологические термины послужили названием для населенных пунктов, городов, местностей и т. д.

7. Блиц-опрос по теме «Водные объекты суши».

1) Рекой называется –

2) Гидрографическая сеть –

3) Назовите признаки главной реки.

4) Что такое притоки первого порядка?

5) Дать определение истока реки.

8. Знание номенклатуры.

1. Определите озеро и реку по описанию. Озеро на северо-западе европейской части России, второй по величине пресноводный водоем в Европе. Относится к бассейну Балтийского моря. Котловина расположена на стыке геологических структур: Балтийского щита и Русской платформы, она ледниково-тектонического происхождения. В озеро впадают около 50 рек, а вытекает только одна.

2. Керепакупаи-меру (исп., Salto Ángel, что значит «Водопад глубочайшего места»), общая высота 979 метров. Под каким названием мы его знаем и где он находится?

3. Озеро в западной части Кольского полуострова, крупнейшее в Мурманской области. Местное лопарское название озера «Айверьявр» вышло из употребления. Название сочетает два слова: «ледовый материк», или «большое ледовое пространство» («иинн» – «лёд», «мандерра» – «материк»). У саамов – это большие озера с извилистой береговой линией и множеством островов.

## Литература


Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.12.2020) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021) [Электронный ресурс] // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения 12.03.2021).

Географическая номенклатура: учебное пособие для студентов вузов / сост. А. С. Литвин, Р. Ф. Антонова, Т. В. Вага и др. Петрозаводск: ПетрГУ, 2015. 44 с.

Географическая номенклатура по курсу «География Карелии»: физическая география: учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки бакалавриата «Туризм» / сост. М. С. Потахин, С. Б. Потахин; М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования Петрозавод. гос. ун-т. Петрозаводск: ПетрГУ, 2020. 40 с.

Географическая номенклатура по курсу «Общее землеведение». Часть 1: учебно-методическое пособие / сост. Р. Ф. Антонова, Т. В. Вага, И. В. Щеколдина. Петрозаводск: ПетрГУ, 2019. 168 с.

Географическая номенклатура: учебное пособие / Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «КГПУ»; сост. С. Б. Потахин и др. Петрозаводск: КГПУ, 2007. 32 с.

*Мурзаев Э. М.* Слово на карте: Топонимика и география / Э. М. Мурзаев. М.: Армада-пресс, 2001. 446 с.

Нормализация географических наименований [Электронный ресурс]. URL: http://www.mobigeo.ru/normalizatsiya-geograficheskikh-naimenovanii.html (дата обращения 12.03.2021).

*Половинкин А. А.* Общая физическая география. Основы общего землеведения. М., 1952. 152 с.

*Поспелов Е. М.* Географические названия мира. Топонимический словарь / Е. М. Поспелов. М.: Астрель, 2002. 512 с.

*Рассказова Н. М.* Географические названия и их изучение в курсе «Физическая география материков и океанов: Материалы II Междунар. научно-практ. конф. «Непрерывное географическое образование: новые технологии в системе высшей и средней школы». Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. 190 с.

Федеральный закон «О наименованиях географических объектов» [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikisource.org/wiki/Федеральный_закон» О наименованиях географических объектов» (дата обращения 12.03.2021).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Антонова Регина Фоминична**
доцент каф. наук о Земле и геотехнологий
Института лесных, горных
и строительных наук, к.г.н.
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 29, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: regina24.68@mail.ru

**Щеколдина Ирина Викторовна**
доцент каф. наук о Земле и геотехнологий
Института лесных, горных
и строительных наук, к.г.н.
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 29, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: geolook@mail.ru

**CONTRIBUTORS:**

**Antonova, Regina**
Institute of Forestry, Mining and Construction,
Petrozavodsk State University
29, Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: regina24.68@mail.ru

**Shchekoldina, Irina**
Institute of Forestry, Mining and Construction,
Petrozavodsk State University
29, Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: geolook@mail.ru

УДК 556.5 (470.22)

# ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ КАРЕЛИИ

**А. В. Литвиненко**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,*
*ФИЦ «Карельский научный центр РАН»*

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные особенности гидрографической сети Республики Карелия и кратко оценены основные природные факторы, их определяющие (геологическое строение, рельеф, климат, географическое положение республики). Дана характеристика водоемов (озера, водохранилища) и водотоков (реки, ручьи) и их специфики. Показано распределение по размерам и приведены количественные параметры основных из них. Рассмотрена основная региональная особенность гидрографической сети Карелии – озерно-речные системы (на примере крупнейшей из них – Ковды). Приводятся данные по запасам воды и водным ресурсам. Показано, что водообеспеченность республики высокая и по суммарным ресурсам речного стока превышает среднероссийские показатели в 1,3 раза на 1 км$^2$ территории и в 3 раза на одного жителя. Это свидетельствует о том, что обеспеченность Карелии поверхностными водными ресурсами достаточно высока и количественные параметры не являются фактором, лимитирующим развитие экономики республики (даже учитывая внутригодовую неравномерность речного стока). Существующие проблемы с водоснабжением населения и отдельных хозяйственных объектов имеют либо организационно-технический характер, либо связаны с несоответствием качества воды природных источников предъявляемым требованиям. Показаны особенности гидрохимического состава поверхностных вод, основными из которых являются очень низкая минерализация и высокое содержание органических веществ (повышенная цветность), что дало основание выделить особый, «карельский» тип качества вод. Определены особенности гидрографии и обеспеченности водными ресурсами, основными из которых можно считать малую водность, большие удельные падения и большую порожистость рек, большой озерный фонд, значительные запасы поверхностных водных ресурсов при относительно низких подземных, очень специфический характер качества вод.

**Ключевые слова:** водная сеть; реки; озера; водохранилища; запасы вод; качество вод.

# MAIN FEATURES OF THE HYDROGRAPHIC NETWORK AND WATER RESOURCES OF KARELIA

**A. V. Litvinenko**

*Northern Water Problems Institute,*
*Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*

**Summary.** The article describes the main features of the hydrographic network of the Republic of Karelia and gives an overview of the main natural factors that define them (geological structure, relief, climate, geographical position). The characteristics of reservoirs (lakes, storage reservoirs) and watercourses (rivers, streams) and their specific features are given. The size distribution and quantitative parameters of the main bodies are given. The main regional feature of the hydrographic network of Karelia is highlighted – so-called lake-river systems (through the example of the largest one – Kovda system). Data on water reserves and water resources are provided. It is shown that the republic has an ample water supply, which exceeds the pan-Russian average 1.3-fold per 1 km$^2$ of territory and 3-fold per resident in terms of total streamflow resources. Hence, surface water availability in Karelia is quite high and its quantities are not a limiting factor for the development of the republic's economy (even with the intra-annual streamflow fluctuations). The problems existing in water supply to the population and economic facilities are either administrative and technical in nature, or caused by non-compliance of the water quality from natural sources. The lecture described the characteristic features of the hydrochemical composition of surface waters, the main ones being very low total

dissolved solids content and high organic matter content (intensive color), which gave reason to distinguish a special "Karelian" type of water quality. The features of hydrography and water availability are specified, the main ones being low water content, large specific drops and aboundance of rapids and riffles in rivers, a large pool of lakes, substantial surface water resources but relatively low underground water resources, a specific water quality.
**Keywords:** water network; rivers; lakes; storage reservoirs; water reserves; water quality.

**Тема лекции.** «Основные особенности гидрографической сети и водных ресурсов Карелии».

**Цель и задачи.** Получение базовых знаний о характере и особенностях водной сети Карелии и определяющих ее природных факторах. Предоставление краеведческой информации о гидрографии республики.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Природные факторы формирования гидрографической сети.
2. Водоемы (озера и водохранилища).
3. Водотоки (реки, ручьи и каналы).
4. Запасы воды и водные ресурсы.

Заключение.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** Подготовлены презентации «Гидрографическая сеть Карелии и ее особенности», «Использование водных ресурсов Карелии».

## Изложение материала

**Введение.** Карельский гидрографический район – уникальное явление не только в России, но и в мире. Сравнится с ним по своеобразию, сложности строения, степени развития речной сети, величине озерности, специфике гидрохимического состава и другим характеристикам могут в какой-то степени только сопредельная Финляндия и некоторые районы Канады. Это обусловлено всем комплексом природных условий региона и, в свою очередь, оказывает существенное влияние на специфику экономики республики и экологическую ситуацию в целом. Рассмотрению этих вопросов и посвящена данная статья.

Представленный материал может быть использован при подготовке лекций для студентов географических, экологических и биологических специальностей вузов и при изучении географии, природоведения, краеведения или на факультативных занятиях в общеобразовательных школах Карелии.

**1. Природные факторы формирования гидрографической сети.** Специфика гидрографии любого региона обусловлена особенностями всего комплекса природных условий. Но всегда можно выделить несколько из них, внесших основной вклад в формирование водной сети. Для Карелии это, в первую очередь, геологическое строение территории, ее рельеф и климат, а также географическое положение республики.

В геологическом отношении Карелия является восточной окраиной Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита – области распространения преимущественно древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса возрастом до 3,5 млрд лет. Они перекрыты тонким слоем четвертичных отложений, представленных сложным комплексом ледниковых (в основном), межледниковых и послеледниковых отложений. Их мощность колеблется от 0 до 110–130 м. Максимальные значения отмечаются в крайней южной части (Пудожском и Олонецком районах). Небольшая юго-восточная часть Карелии сложена осадками Русской плиты Восточно-Европейской платформы.

Главные элементы рельефа обусловлены сочетанием древних тектонических процессов с денудацией и аккумуляцией четвертичного периода, важнейшим событием которого были мощные материковые оледенения. Основное влияние на формирование современного рельефа оказало последнее из них – Валдайское (поздневалдайское), закончившееся только 10–11 тыс. л. н., что в геологическом масштабе времени представляет собой ничтожно малую величину.

Двигавшийся со Скандинавии ледник произвел большую разрушительную работу, следы которой видны до сих пор. Он принес и после своего таяния отложил на земной поверхности большие объемы несортированных обломков горных пород (морены). В результате сформировался очень специфический чрезвычайно расчлененный грядово-холмистый рельеф с абсолютными отметками, не превышающими 200 м. И только на крайнем северо-западе, на горном массиве Маанселькя они достигают 500–600 м (г. Нуорунен – 577 м, Мянтютунтури – 550, Сиэппитунтри – 537, Кивакка – 500 м). Высоты Западно-Карельской возвышенности составляют 330–417 м, Олонецкой – до 313 м, а основная часть территории лежит в пределах 100–200 м над уровнем моря.

Для южных районов республики характерна северо-западная ориентировка форм рельефа, для северных – широтная, реже северо-восточная или северо-западная, что во многом определило и ориентировку водных объектов, в первую очередь рек. Деятельность ледника и ледниковых вод придала особый облик доледниковому рельефу, не меняя его главных черт. В частности, сохранились результаты вертикальных тектонических движений, сопровождавшихся поднятиями и опусканиями земной коры. В то время образовались котловины Ладожского, Онежского и других озер, Белого моря. В трещинах и разломах заложились речные долины. Но в целом современная гидрографическая сеть начала формироваться только после ухода ледника, и этот процесс продолжается и сейчас.

Климат Карелии переходный от морского к континентальному. В течение всего года для него характерно преобладание воздушных масс атлантического и арктического происхождения. Климат характеризуется продолжительной мягкой зимой и коротким прохладным летом, значительной облачностью, высокой влажностью и неустойчивой погодой в течение всего года. Наиболее существенное значение для формирования гидрографической сети и гидрологического режима водных объектов имеют атмосферные осадки и испарение. Территория республики относится к зоне избыточного увлажнения, что определяется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью во все сезоны. Количество осадков составляет 550–750 мм в год, возрастая с севера на юг. В то же время вследствие невысоких летних температур, большой облачности, повышенной влажности воздуха Карелия является зоной относительно малого испарения, составляющего от 310 мм в год на севере до 420 мм на юге. Таким образом, испаряется только 50–60 % осадков, остальная часть идет на формирование речного стока.

Большое значение имеют также особенности географического положения республики, которые заключаются в прохождении по ее территории Беломорско-Балтийского водораздела (он же является и одним из основных водоразделов Земли – между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами) и близости к нему крупных базисов эрозии (приемников речного стока) – Белого моря, Ладожского и Онежского озер (рис. 1). Максимальное расстояние от водораздела до водоприемников не превышает по прямой 300 км. К беломорской части относится 57 % территории республики, к балтийской – 43 % (без учета относящихся к Республике Карелия частей акваторий Белого моря, Ладожского и Онежского озер). В свою очередь, на территории бассейна Балтийского моря выделяются бассейны Ладожского и Онежского озер и маленький участок водосбора Ботнического залива, на западе республики в районе г. Костомукши. На юго-востоке Карелии в Пудожском районе на территорию республики попадает небольшой (несколько десятков км$^2$) участок бассейна крупного бессточного водоема – Каспийского моря-озера.

Таким образом, суммируя вышесказанное, следует сказать, что главными факторами, определившими специфику гидрографической сети Карелии, являются:

– геологическая молодость гидрографической сети;

– неглубокое залегание кристаллических пород и малая мощность рыхлых четвертичных отложений;

– наличие множества заполненных водой тектонических нарушений;

– чрезвычайно расчлененный рельеф ледникового происхождения;

– сравнительное обилие атмосферных осадков при низком испарении;

– близость главного водораздела к базисам эрозии [Литвиненко, 1999].

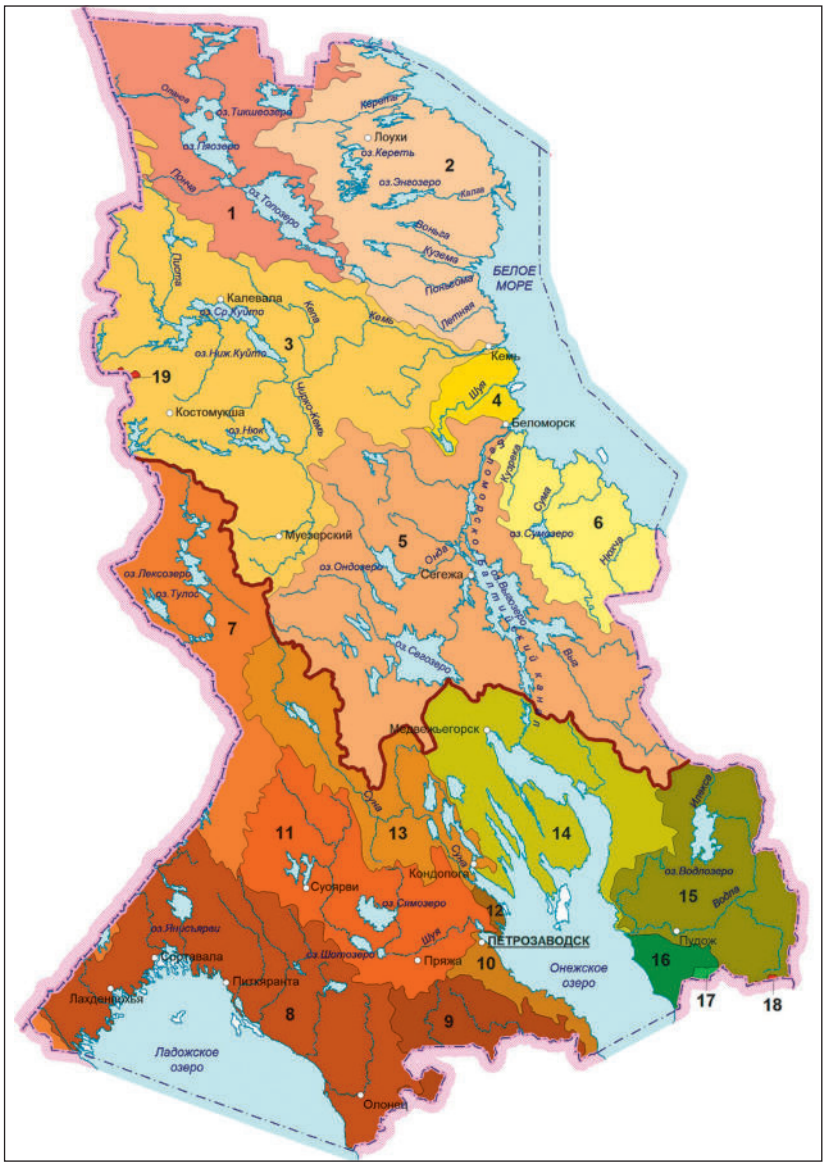



**Рис. 1.** Беломорско-Балтийский водораздел и водосборы основных водных систем:

1 – р. Ковда; 2 – от устья р. Ковды до устья р. Кеми; 3 – р. Кемь; 4 – от устья р. Кеми до Беломорско-Балтийского канала (р. Нижний Выг); 5 – Беломорско-Балтийский канал; 6 – от Беломорско-Балтийского канала до устья р. Онеги; 7 – р. Лендерка – р. Вуокса; 8 – Ладожское озеро от устья р. Вуоксы до устья р. Свири; 9 – р. Свирь (без Онежского озера); 10 – Онежское озеро от истока р. Свири до устья протоки без названия № 1401 (Логмозеро, р. Шуя); 11 – протока без названия № 1401 (Логмозеро, р. Шуя); 12 – Онежское озеро от устья протоки без названия № 1401 (Логмозеро, р. Шуя) до устья р. Суны; 13 – р. Суна; 14 – Онежское озеро от устья р. Суны до устья р. Водлы; 15 – р. Водла; 16 – от устья р. Водлы до устья р. Андомы; 17 – р. Андома; 18 – р. Волга; 19 – притоки Ботнического залива:

толстой коричневой линией обозначен Беломорско-Балтийский водораздел

**Fig. 1.** The Baltic-White Sea watershed and catchments of the main water systems:

1 – River Kovda; 2 – from the mouth of River Kovda to the mouth of River Kem; 3 – River Kem; 4 – from the mouth of River Kem to the Baltic-White Sea Canal (River Nizhny Vyg); 5 – Baltic-White Sea Canal; 6 – from the Baltic-White Sea Canal to the mouth of River Onega; 7 – Rivers Lenderka – Vuoksa; 8 – Lake Ladoga from the mouth of River Vuoksa to the mouth of River Svir; 9 – River Svir (excluding Lake Onego); 10 – Lake Onego from the source of River Svir to the mouth of the nameless passage N 1401 (Lake Logmozero, River Shuya); 11 – nameless passage N 1401 (Lake Logmozero, River Shuya); 12 – Lake Onego from the mouth of the nameless passage N 1401 (Lake Logmozero, River Shuya) to the mouth of River Suna; 13 – River Suna; 14 – Lake Onego from the mouth of River Suna to the mouth of River Vodla; 15 – River Vodla; 16 – from the mouth of River Vodla to the mouth of River Andoma; 17 – River Andoma; 18 – River Volga; 19 – tributaries to the Gulf of Bothnia:

thick brown line marks the Baltic-White Sea watershed

**2. Водоемы**[1] **(озера и водохранилища).** Основными структурными элементами гидрографической сети Карелии являются водоемы (озера и водохранилища), во многом определяющие специфику водных систем республики. Согласно инвентаризации 1950-х гг., на территории республики было зафиксировано 42,6 тыс. озер общей площадью 16,2 тыс. км$^2$ [Григорьев, Грицевская, 1959]. Поздние подсчеты, выполненные на более новой картографической основе, позволили уточнить цифры.

По современным данным, число озер с площадью более 1 га составляет 61,1 тыс., суммарная их площадь – около 18 тыс. км$^2$ [Гашева, 1967]. Нетрудно рассчитать, что 1 водоем приходится примерно на 10 жителей Карелии. Кроме того, в пределах республики находится около 40 % акватории Ладожского и 80 % Онежского озер, являющихся крупнейшими пресноводными водоемами Европы. Озерность территории составляет 11,4 %, а с учетом карельских частей Онего и Ладоги достигает 19,1 %, являясь одной из самых высоких в мире (принимая площадь Карелии равна 172,4 тыс. км$^2$ с включением онежской и ладожской акваторий и 157,5 – без них)[2]. Следовательно, каждый пятый квадратный километр территории Карелии является акваторией.

В размещении озер и в изменении озерности по речным бассейнам наблюдается четкая географическая закономерность. Если южнее р. Свири коэффициент озерности не превышает 2–2,5 %, то в пределах Карелии озерность быстро возрастает, достигая в зоне 62–66º с. ш. максимальных значений (бассейн р. Кереть – 18 %, р. Ковды – 14 %). Далее к северу озерность быстро падает – до 2,5–4 % на водосборах рек Кольского полуострова. Еще быстрее коэффициент озерности убывает с запада на восток. Так, уже бассейны рек Поморского побережья Белого моря и восточных притоков Онежского озера характеризуются величинами не более 4–5 %, а в Архангельской области озерность не достигает и 2 % [Григорьев, 1961].

Основное число составляют озера площадью менее 1 км$^2$. Более значительные размеры имеют только 1389 водоемов (чуть более 2 % от общего числа), из них лишь 20 превышают 100 км$^2$ (табл. 1). В группе малых водоемов преобладают озера, не имеющие видимого стока (бессточные), которые представлены в основном лесными и болотными озерцами (ламбами).

**Таблица 1.** Основные характеристики озер с площадью зеркала более 200 км$^2$ в современном состоянии [Каталог озер и рек Карелии, 2001; Озера Карелии..., 2013]

**Table 1.** Key characteristics of lakes with current water surface area > 200 km$^2$ [Katalog ozer i rek Karelii, 2001; Ozera Karelii..., 2013]

| Водоем | Водосбор главной реки | Площадь, км$^2$ | | Глубина, м | | Объем, км$^3$ | Длина береговой линии, км |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | водосбора | зеркала | средн. | макс. | | |
| Ладожское | Нева | 258 300 | 17 700 | 51 | 230 | 910 | 1570 |
| Онежское* | Нева | 53 100 | 9720 | 30 | 120 | 295 | 1810 |
| Выгозеро* | Нижний Выг | 16 800 | 1251 | 5,8 | 25,0 | 7,2 | 658 |
| Топозеро* | Ковда | 2540 | 986 | 15,9 | 56,0 | 15,6 | 545 |
| Пяозеро* | Ковда | 12 000 | 943 | 17,7 | 49,0 | 16,7 | 256 |
| Сегозеро* | Нижний Выг | 6640 | 815 | 29 | 103 | 23,4 | 278 |
| Водлозеро* | Водла | 4960 | 322 | 2,8 | 16,3 | 0,906 | 232 |
| Сямозеро | Шуя | 1550 | 266 | 6,7 | 24,5 | 1,79 | 159 |
| Среднее Куйто* | Кемь | 9470 | 257 | 10,4 | 34,0 | 2,67 | 166 |
| Верхнее Куйто | Кемь | 7150 | 240 | 8,7 | 44,4 | 2,09 | 295 |
| Кереть | Кереть | 1100 | 223 | 4,5 | 26,0 | 1,0 | 346 |
| Нюк | Кемь | 3090 | 214 | 8,5 | 40,0 | 1,81 | 255 |
| Тикшозеро | Ковда | 1080 | 209 | 8,0 | 41,0 | 1,68 | 203 |

*Примечание.* * Водоем зарегулирован и является водохранилищем.

[1] Водоемы – водные объекты в понижениях земной поверхности с замедленным движением вод (океаны, моря, озера, водохранилища, пруды, болота).

[2] В ряде справочных изданий указывается, что площадь Республики Карелия составляет 180,5 тыс. км$^2$, с учетом части акватории Белого моря.

Основные водоемы Карелии показаны на рис. 2.

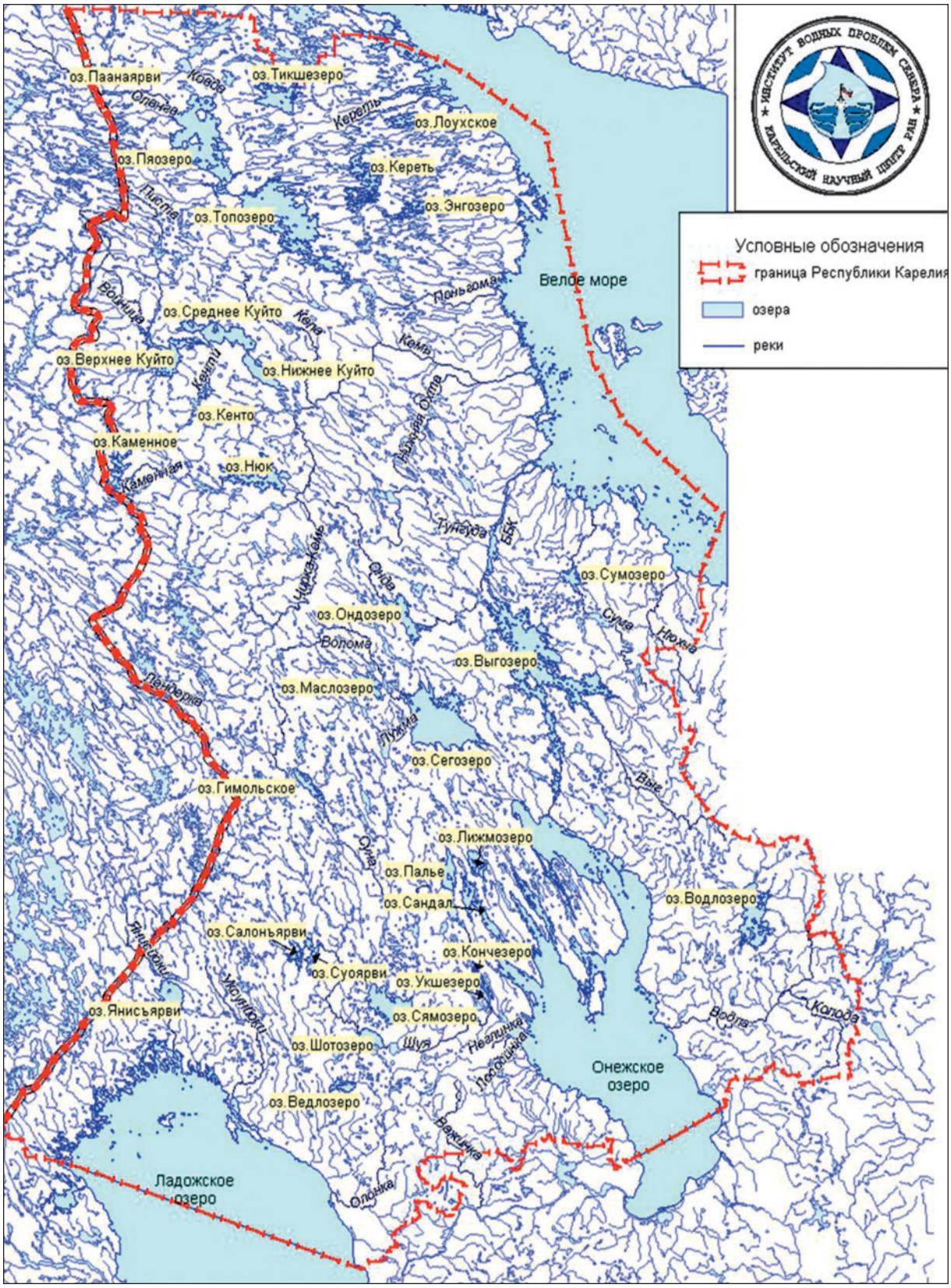



**Рис. 2.** Гидрографическая сеть Карелии и основные озера

**Fig. 2.** Republic of Karelia hydrographic network and main lakes

В Карелии выделяются два основных типа озерных котловин по происхождению: тектонические и ледниковые (моренные). Почти все крупные и средние водоемы имеют тектонический генезис. Их котловины развиты в трещинах и сбросах с ярко выраженными следами эрозионной деятельности ледников. Они имеют, как правило, сложные очертания берегов и пересеченный рельеф дна, большие глубины.

Озера ледникового типа расположены в понижениях между моренными грядами и холмами или в подпруженных речных долинах. Они небольших размеров, имеют менее изрезанную, часто округлую форму, плоское дно без резких перепадов глубин, которые не превышают, как правило, 5–10 м. Также встречаются узкие длинные озера, через которые протекают реки. Кроме того, существует много мелких озер болотного происхождения [Григорьев, 1961].

Одной из форм хозяйственного использования водных ресурсов является регулирование речного стока путем создания водохранилищ. Как уже отмечалось выше, молодые в геологическом отношении реки Карелии имеют неглубокие, слабо врезанные долины. Поэтому долинные водохранилища, ложем которых служит часть речной долины, даже ценой больших затоплений, имеют незначительные объемы. Основным типом водохранилищ являются котловинные (озерные), созданные почти на всех крупных озерах (см. табл. 1). Преобладание котловинных водохранилищ является региональной особенностью республики, так как большинство водохранилищ в бывшем СССР и во всем мире долинные. Этот факт еще раз подчеркивает специфику гидрографической сети Карелии.

**3. Водотоки**[3] **(реки, ручьи и каналы).** Они представлены большей частью либо небольшими реками, либо короткими протоками, которые соединяют многочисленные озера, образуя озерно-речные системы, что является региональной особенностью гидрографической сети Карелии. Линейная озерность (отношение длины озерных участков к общей длине системы) таких водных объектов может достигать 50–60 % и более (озерно-речные системы Ковда, Лендерка, Каменная – Ногеус-йоки). Это создает определенные трудности при подсчете количества рек на какой-либо территории, так как не всегда понятно, какой водоток принимать за самостоятельную реку, а какой – за составную часть озерно-речной системы. Часто этот вопрос решается чисто субъективно. Так, например, озерно-речная система Ковда (рис. 3) включает по основной оси 11 озер и водохранилищ (Топозеро, Пяозеро, Кундозеро, Соколозеро, Ковдозеро и др.) и 7 раз меняет свое название (Софьянга, Кундозерка, Кума, Ругозерка, Ковдочка, Иова).

Первая инвентаризация водотоков Карелии была выполнена в 1950-е гг. сотрудниками Отдела водных проблем (в настоящее время Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН) под руководством С. В. Григорьева. В пределах административных границ было выявлено 10 987 рек общей длиной 53 333 км.

По современным данным общее число рек (включая Карельский перешеек) составляет 26,7 тыс. Суммарная их протяженность – 83 тыс. км. Преобладают водотоки длиной менее 10 км. Их количество 25,3 тыс. (95 %), общая протяженность – 52,3 тыс. км (63 %) [Ресурсы поверхностных вод…, 1972]. Они уже относятся к категории ручьев. Только 30 рек имеют длину более 100 км и их можно отнести, с некоторыми оговорками, к классу средних (табл. 2). Густота речной сети составляет 0,53 км/км$^2$. Площадь водосбора у подавляющего числа рек также мала. Только 366 водных систем имеют бассейны площадью более 100 км$^2$, в том числе 51 система с водосбором, превышающим 1000 и 5 – 10 000 км$^2$ (реки Кемь, Выг, Ковда, Водла, Шуя).

Основные карельские реки и их водосборы представлены на рис. 1.

Молодостью карельских рек и особенностями кристаллического фундамента объясняется слабая врезанность их русел, неразвитость речных долин, ступенчатый характер продольного профиля, представляющего собой ряд порожистых участков, чередующихся с плесами. Часто роль плесовых участков выполняют озеровидные расширения или озера.

Близостью к водоразделам основных базисов эрозии обусловлено значительное падение рек. Большая часть его величины (80–90 %) приходится на пороги и карешки (небольшие порожки). Для малых рек величина падения может достигать 10 м/км (р. Неглинка), при преимущественной 2–5 м/км. Более крупные реки имеют меньшее удельное падение, редко превышающее 1 м/км, но и на них сосредоточенные падения на отдельных участках достигают значительных величин.

[3] Водотоки – водные объекты на земной поверхности с поступательным движением воды в руслах в направлении уклона.

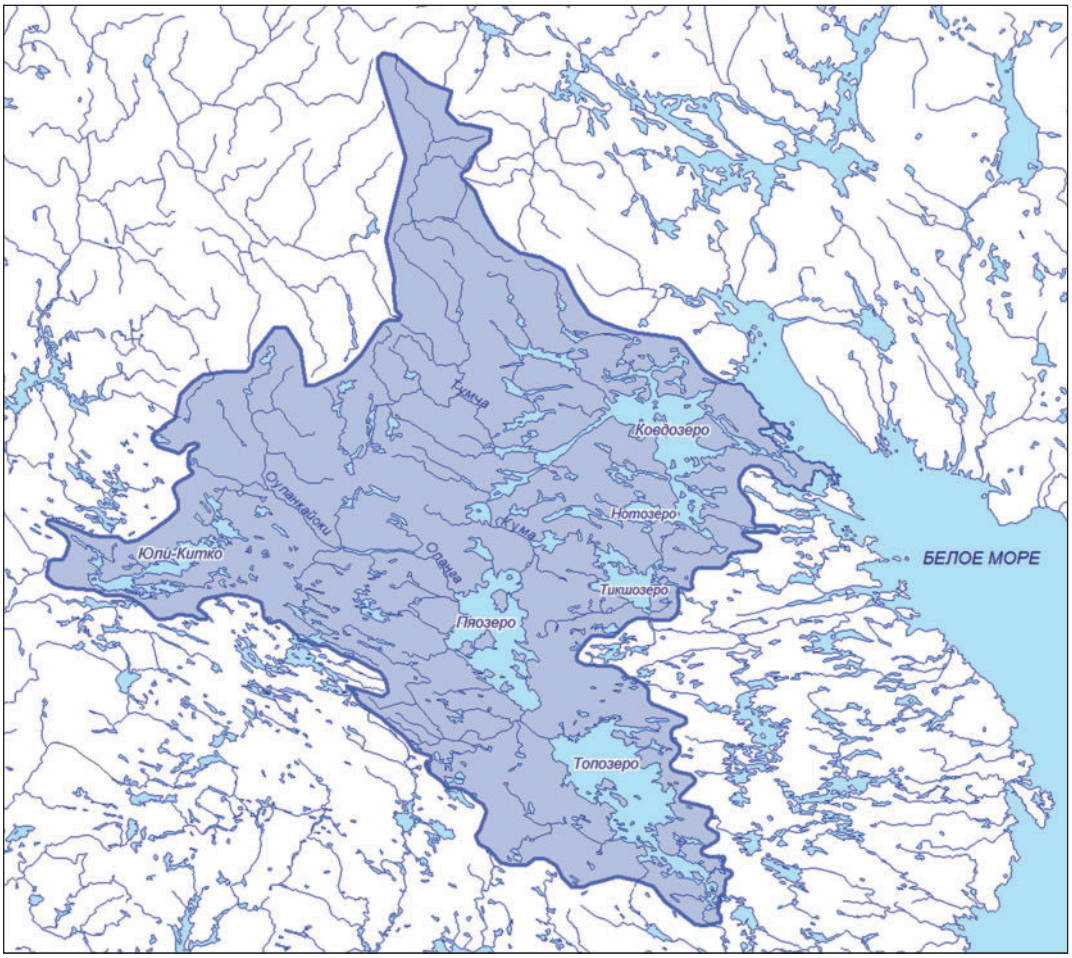



**Рис. 3.** Озерно-речная система Ковда

**Fig. 3.** Kovda lake-river system

**Таблица 2.** Характеристика основных рек Карелии [Ресурсы поверхностных вод..., 1965]

**Table 2.** Characteristics of major Karelian rivers [Resursy poverkhnostnykh vod..., 1965]

| Название реки | Длина, км | Площадь водосбора, км$^2$ | Площадь озер на водосборе, км$^2$ | Принятый исток |
|---|---|---|---|---|
| Бассейн Белого моря | | | | |
| Ковда | 233 | 26 100 | 3656 | Топозеро |
| Тумча | 207/172 | 5240/... | 215/... | То же |
| Кемь | 191 | 27 700 | 2568 | оз. Нижнее Куйто |
| Чирка-Кемь | 221 | 8270 | 704 | Слияние рек Чирка и Кемь |
| Нижний Выг (Беломорско-Балтийский канал) | 188 | 27 100 | 3795 | Выгозеро |
| Выг (Верхний Выг) | 135 | 3000 | 71,1 | оз. Верхотинное |
| Онда | 197 | 4080 | 509 | |
| Бассейн Балтийского моря | | | | |
| Собственный бассейн Ладожского озера и р. Свири | | | | |
| Лендерка | 150/41 | .../4890 | .../604 | оз. Сула |
| Койтайоки | 162/48 | .../... | .../... | оз. Алинен-Айтоярви |
| Янисйоки | 126/70 | 3900/... | .../279 | На территории Финляндии |
| Бассейн Онежского озера | | | | |
| Шуя | 194 | 10 100 | 1071 | оз. Суоярви |
| Суна | 280 | 7670 | 987 | оз. Кивиярви |
| Водла | 149 | 13 700 | 723 | Слияние рек Сухая Водла и Вама |

*Примечания.* 1. Данные по р. Суне даны для водосбора в естественном состоянии. 2. В числителе приводятся данные для всего водосбора, в знаменателе – для территории России. 3. Знак (...) обозначает отсутствие данных.

Характерной особенностью карельской гидрографии являются также узкие невысокие водоразделы и близость соседних водотоков, что создает условия для переброски стока в другие бассейны (р. Суна – оз. Палье, р. Поньгома – оз. Топозеро). А сложный изрезанный рельеф в условиях водораздельного расположения озер часто определяет сток из них по нескольким направлениям одновременно: оз. Энгозеро: реки Калга и Воньга, оз. Сариярви: реки Лоймоланйоки (Тулемайоки) и Пенсанйоки (Уксунйоки), оз. Сегежское: реки Обжанка и Сегежа (приток р. Свири).

**4. Запасы воды и водные ресурсы.** Основной объем пресной воды аккумулируется в водоемах. Так, в водохранилищах содержится 80,2 км$^3$ (без Верхне-Свирского). Из них общая полезная емкость составляет 18,6 км$^3$, что позволяет регулировать 47 % годового объема речного стока. Еще 65,0 км$^3$ воды сосредоточено в озерах, остающихся в естественном состоянии. Кроме того, к этим цифрам следует добавить бóльшие части объемов Онежского (Верхне-Свирское водохранилище) и Ладожского озер. Основная часть вод, содержащихся в водоемах (78 %), находится в бассейне Белого моря, где они представлены главным образом водами водохранилищ. Здесь расположено около 90 % общей полезной емкости водохранилищ, регулируется 63 % объема речного стока.

В Балтийском бассейне вóды сосредоточены в основном в озерах, сток менее зарегулирован и реки менее водоносны.

Пресные воды, накапливаемые в озерах и водохранилищах, относятся к стационарным запасам, или вековым водным ресурсам с очень низкой скоростью возобновления. При современном водохозяйственном планировании их интенсивное использование обычно не предусматривается из-за возможных отрицательных экологических последствий. Как водные ресурсы эти объекты можно рассматривать лишь с точки зрения способов использования, не меняющих их количественных параметров (водный транспорт, рекреация, рыбное хозяйство). Для водопотребляющих отраслей экономики наибольший интерес представляют динамические, непрерывно возобновляющиеся запасы. А это – речной сток. Подсчитано, что вследствие круговорота воды в природе запас воды в руслах всех рек земного шара возобновляется 23 раза в год, или один раз в 16 суток. И если его одномоментный объем составляет 2120 км$^3$, то средний годовой объем стока всех рек Земли достигает 46 тыс. км$^3$. Именно он и является основным видом водных ресурсов. Следует также помнить, что речной сток – существенный (наряду с атмосферными осадками) источник пополнения озерных и подземных вод.

На большей части республики средний многолетний модуль речного стока[4] колеблется в районе 10 л/сек*км$^2$, так как большое количество озер на водосборах в сочетании с болотами и заболоченными лесами, которые занимают около 30 % площади, нивелируют величину среднего многолетнего стока по территории. Однако подстилающая поверхность и орографические особенности местности оказывают значительное влияние на распределение осадков, а следовательно, и связанного с ними стока по территории. На севере республики наибольшие величины годового стока (11–12 л/сек*км$^2$) наблюдаются на возвышенных участках (Северный возвышенный район с высотами 300–400 м и более над уровнем моря). На Прибеломорской низменности и в понижениях у крупных озер-водохранилищ сток уменьшается до 8–9 л/сек*км$^2$. В южной части Карелии максимальные значения стока (12–16 л/сек*км$^2$) отмечаются на северо-восточных притоках Ладожского и восточных притоках Онежского озер.

Объем сток рек Карелии в средний по водности год составляет 57 км$^3$. Непосредственно на ее территории формируется 49,7 км$^3$ (так называемый «местный сток»). Остальные воды (13 %) поступают из сопредельных регионов (в основном из Финляндии и Архангельской области). Около 55 % речного стока с территории республики поступает в Белое море, 25 – в Онежское и 20 % – в Ладожское озера [Литвиненко, Карпечко, Филатов, 2006].

Учитывая многолетние колебания речного стока и исходя из условий наиболее полного удовлетворения в воде всех отраслей экономики, в водохозяйственной практике ориентируются на сток маловодного года, как правило, 95 %-ной обеспеченности (повторяемость в среднем один раз в 20 лет). В таких условиях местный сток составляет 63 % от среднемноголетнего, или 31,8 км$^3$.

Абсолютные показатели не дают полного представления об обеспеченности водными ресурсами. Более наглядны относительные характеристики – объем речного стока, приходящийся

[4] Модуль речного стока – объем воды (литры или м$^3$), стекающей с определенной площади бассейна (км$^2$) в единицу времени (1 сек).

на единицу площади или одного жителя. Так, на 1 км$^2$ территории Карелии приходится 331 тыс. м$^3$, а на одного жителя республики – 93 тыс. м$^3$ суммарного речного стока, что больше среднероссийских показателей в 1,3 и 3 раза соответственно. Здесь следует отметить, что другой важный вид водных ресурсов – подземные воды – изучены значительно слабее, а их запасы и объемы использования гораздо меньше [Богачев, Бородулина, Игонин, 2006].

Таким образом, обеспеченность Карелии поверхностными водными ресурсами достаточно высока и количественные параметры не являются фактором, лимитирующим развитие экономики республики (даже учитывая внутригодовую неравномерность речного стока). Существующие проблемы с водоснабжением населения и отдельных хозяйственных объектов имеют либо организационно-технический характер, либо связаны с несоответствием качества воды природных источников предъявляемым требованиям. А качество карельских поверхностных вод в плане потребительских свойств имеет свою специфику. Некоторые ученые даже выделяют отдельный, «карельский» химический тип вод.

В качестве приоритетных показателей, отражающих специфику химического состава вод региона, приняты: минерализация воды[5] и ее жесткость[6], pH[7], содержание органических веществ, железа. Поверхностные воды Карелии относятся к категории очень маломинерализованных и очень мягких, на большей части территории минерализация до 25 мг/л и жесткость 0,2–0,4 мг-экв/л. Небольшую площадь занимают озера и реки с минерализацией 40–100 мг/л. Водоемов с суммой ионов свыше 100 мг/л известно не более 10. По этим показателям они соответствуют принятым в Российской Федерации нормативам для питьевого водоснабжения (до 1000 мг/л). Нижние показатели минерализации не нормируются, но известно, что оптимальными для человека являются более высокие ее значения – до 300–400 мг/л. Таким образом, по этому показателю поверхностные воды Карелии не являются качественными, так как основным источником поступления в организм человека минеральных солей является именно вода. Однако они являются очень качественными для некоторых видов технического использования (теплообменные аппараты – паровые котлы, испарители, пароперегреватели и т. п.) и в быту (чайники, стиральные машины, утюги), так как при нагревании не дают большого количества накипи.

По величине pH большую часть поверхностных вод Карелии можно отнести к слабокислым (pH = 5,5–6,5) и нейтральным (pH = 6,5–7,5), что вполне соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам.

Наиболее «проблемный» показатель – цветность воды. В настоящее время в Карелии почти во всех существующих поверхностных источниках водоснабжения наблюдается превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по этому показателю. Цветность воды обусловлена присутствием в ней органических веществ (ОВ) гумусового происхождения. Для значительной части территории республики (до 35 %) характерны воды со средним для условий Карелии содержанием ОВ (цветность 35–80 град. по платиново-кобальтовой шкале). На 20 % территории распространены воды с высоким содержанием ОВ (цветность – 80–160 град.). Приблизительно такое же распространение имеют воды с низкой гумозностью (менее 35 град.).

Гумусовые вещества обладают хорошей комплексообразующей способностью и образуют с железом, марганцем и многими другими металлами прочные комплексные соединения. Поэтому для высокоцветных вод характерно высокое содержание железа и марганца, которое также часто превышает ПДК [Литвиненко и др., 1998; Морозов, Литвиненко, 2006].

**Заключение.** Карелия имеет очень своеобразную, уникальную гидрографическую сеть, не имеющую аналогов в мире, сравнимую только с Канадой и сопредельной Финляндией, для которых также характерно большое количество водоемов (более 4 млн в Канаде и около 180 тыс. в Финляндии), однако вследствие гораздо бóльших территорий этих стран коэффициенты озерности для них примерно в 2 раза ниже, чем для Карелии.

---

[5] Общая минерализация – показатель количества содержащихся в воде растворенных веществ: неорганических солей (бикарбонаты, хлориды и сульфаты кальция, магния, калия и натрия) и органических веществ.

[6] Жесткость воды – совокупность химических и физических свойств воды, связанных с содержанием в ней растворенных солей щелочноземельных металлов, главным образом кальция и магния (так называемых солей жесткости).

[7] pH – величина, характеризующая меру активности ионов водорода в растворе, количественно характеризующая его кислотность. Показывает, насколько кислым или щелочным является раствор вещества. Значение 7 – нейтральная реакция, менее 7 – кислая реакция, более 7 – щелочная реакция.

П о н я т и я . Гидрография, водоемы, озера, водохранилища, озерность, водотоки, реки, густота речной сети, запасы воды, водные ресурсы, модуль стока, качество воды, водообеспеченность.

П е р с о н а л и и . Григорьев Сергей Владимирович (1888–1974), советский гидролог, гидроэнергетик, гидротехник. Основатель (1947) и многолетний руководитель Отдела водных проблем (в настоящее время Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН). Автор и руководитель многочисленных исследований гидрографии, гидрологии, водных ресурсов и их использования, истории изучения и освоения водных объектов. Доктор технических наук, Заслуженный деятель науки Карело-Финской ССР.

## Задания

1. Назовите и покажите на карте основные водные объекты вашего региона, России и мира.
2. Какие виды водных объектов, кроме перечисленных в статье, вы знаете? Оцените возможности их использования в качестве источников водоснабжения.
3. Охарактеризуйте значение и механизм процесса круговорота воды в природе.
4. Определите по справочной литературе густоту речной сети и озерность вашего региона, других территорий и зарубежных стран и сравните их с карельскими показателями.

*Автор выражает благодарность за большую помощь в подготовке картографических материалов главному специалисту по научно-технической информации ИВПС КарНЦ РАН О. В. Дерусовой.*

## Литература

*Богачев М. А., Бородулина Г. С., Игонин А.* Гидрогеологические условия и ресурсы подземных вод // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 113–127.

*Гашева В. Ф.* Некоторые особенности гидрографии КАССР: сб. работ Ленинградской гидрометеообсерватории. 1967. Вып. 4. С. 103–114.

*Григорьев С. В.* Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1961. 140 с.

*Григорьев С. В., Грицевская Г. Л.* Каталог озер Карелии. М.; Л.: АН СССР (Ленингр. отд-ние), 1959. 240 с.

Каталог озер и рек Карелии / под ред. Н. Н. Филатова, А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 300 с.

*Литвиненко А. В.* Гидрографическая сеть Карелии и ее особенности // Экологическое исследование природных вод Карелии. Петрозаводск, 1999. С. 8–13.

*Литвиненко А. В., Карпечко В. А., Филатов Н. Н.* Особенности гидрографии // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 65–74.

*Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Лозовик П. А., Карпечко В. А.* Региональная экология: эколого-экономические основы рационального использования водных ресурсов Карелии // Инженерная экология. 1998. № 6. С. 3–5.

*Морозов А. К., Литвиненко А. В.* Требования, предъявляемые к питьевой воде // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 87–92.

Озера Карелии. Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 700 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 528 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Литвиненко Александр Васильевич**
старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: aleks-litvinenko@mail.ru

**CONTRIBUTORS:**

**Litvinenko, Alexander**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030,
Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: aleks-litvinenko@mail.ru

УДК 910.1(1-924.14/.16)

# ДЕНДРОИНДИКАЦИЯ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ (ВОСТОЧНАЯ ФЕННОСКАНДИЯ)

**С. П. Гриппа**[1, 2], **С. Б. Потахин**[1]

[1]*Петрозаводский государственный университет, Россия*
[2]*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,*
*ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

**Аннотация.** Дендроиндикационный метод основан на исследовании изменений величины радиального прироста годичных слоев (колец) древесных растений. Ширина годичных колец является одним из косвенных индикаторов явлений и процессов, происходящих в природных комплексах (ПК, геокомплексах) под воздействием естественных и антропогенных факторов. Из всех компонентов ПК растительность является наиболее чувствительной к внешним воздействиям. Она достаточно быстро реагирует на изменения различных факторов среды, определяющих условия ее существования: климатические колебания (в первую очередь – температура и влажность), биоценотическое развитие и антропогенные воздействия. Палеогеографические и историко-географические методы исследования естественных и антропогенных изменений в ПК способствуют изучению их состояния и динамики при ретроспективном анализе и могут быть использованы для прогнозирования изменений компонентов геокомплексов в пределах допустимых математических погрешностей и на период расчетных ритмических колебаний. Датирование индикационных признаков изменений природных процессов и явлений осуществляется на основе дендрохронологических методов.

**Ключевые слова:** дендрохронология; дендроиндикация; дендрогидрология; дендрогеоморфология; природные комплексы; палеогеография; историческая география.

## DENDROINDICATION AS A METHOD FOR STUDYING NATURAL PROCESSES AND PHENOMENA (EASTERN FENNOSCANDIA)

**S. P. Grippa**[1, 2], **S. B. Potakhin**[1]

[1]*Petrozavodsk State University, Russia*
[2]*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Science, Petrozavodsk, Russia*

**Summary.** The method of dendroindication is based on the trend analysis of annual layer (rings) radial growth in trees. The width of annual rings implicitly indicates natural processes in ecosystems, happening due to natural as well as anthropogenic factors. Among all the ecosystem elements, vegetation tends to be the most sensitive to any external impact. The flora reflects the ways environmental factors influence it, defining the conditions for its existence: climate fluctuations, biocoenotic development, and anthropogenic impact. Paleogeographic and historical geographic research methods of studying natural and anthropogenic variations in the nature are useful in retrospective analysis of geocomplexes, their conditions and dynamics; and can be applied in predicting possible changes in elements of an ecosystem.

**Keywords:** dendrochronology; dendroindication; dendrohydrology; dendrogeomorphology; ecosystem; paleogeography; historical geography.

**Тема лекции.** «Дендроиндикация как метод исследований природных процессов и явлений (Восточная Фенноскандия)».

**Цель.** Ознакомление с методами исследований природных комплексов для понимания ретроспективных палеогеографических реконструкций и прогностического анализа.

Задачи. Образовательная задача: получение представления о дендрохронологических и дендроиндикационных методах исследований природных комплексов. Личностная задача: формирование понимания значимости научных исследований при изучении различных геокомплексов. Познавательная задача: формирование интереса к исследовательской деятельности. Предметная задача: усвоение понятий, знание объектов и субъектов исследуемых геокомплексов, объяснение причинно-следственных связей, определение экологических угроз и рисков и возможностей сохранения водных ресурсов. Метапредметная задача: овладение понятиями и терминами; ознакомление с персоналиями.

**План изложения материала.**

Введение в дисциплину: основные понятия – дендрохронология и дендроиндикация.

1. Материалы и методы дендрохронологических и дендроиндикационных исследований.
2. Основные научные области дендрохронологических и дендроиндикационных исследований.
3. Основные научные принципы дендрохронологических и дендроиндикационных исследований.

Заключение.

Демонстрационные и наглядные пособия.

Фотографии и графики по тексту.

## Изложение материала

**Введение в дисциплину: основные понятия – дендрохронология и дендроиндикация.** Растущий интерес к реконструкциям природных процессов и явлений прошлого определяется стремлением исследователей выявить закономерности и ритмику происходящих изменений, использовать полученные данные для расчета возможных сценариев развития геокомплексов в будущем. Эти реконструкции основываются на пространственно-временных принципах, благодаря которым проводится периодизация исследуемого времени – выделение периодов и установление ритмов природных изменений, а также палеогеографическое картографирование.

***Дендрохронология*** – метод изучения временных рядов радиального прироста деревьев, который позволяет, используя запас информации, имеющийся в годичных кольцах, оценивать изменения условий существования дерева и своим приростом реагирует на совокупность климатических показателей, биоценотическое положение дерева в древостое и усиливающееся антропогенное воздействие [Хачатуров, 1989]. Согласно Г. Фриттсу [Fritts, 1976], дендрохронология в широком определении включает в себя все исследования древесных колец, которые, как годовые слои прироста, связаны со специфическими календарными годами. Таким образом, возможно получение достоверной (численной) информации о воздействии внешних факторов на величину прироста годичных колец с точностью до года, а в отдельных случаях и до сезона. В пятиязычном академическом словаре «География: понятия и термины» дается следующее определение дендрохронологии – датирование и реконструкция природных явлений на основе анализа годичных колец деревьев [Котляков, Комарова, 2007].

Однако, на наш взгляд, дендрохронология как метод не может дать оценку всем происходящим в ПК процессам и явлениям. Основной задачей этого метода является создание дендрохронологических шкал (ДХШ), по которым в дальнейшем возможно датировать время воздействия того или иного внешнего фактора. Составной частью дендрохронологического метода стали *дендроиндикационные* принципы, предложенные Н. В. Ловелиусом [1970, 1972] как вполне самостоятельный метод исследования.

***Дендроиндикация*** – установление времени или периода, а также, возможно, и интенсивности воздействия внешних факторов, которые были зафиксированы в годовом приросте древесины в виде существенных отклонений от средних значений ширины годичных колец, таким образом эти аномальные флуктуации становятся индикаторами – специфическими реперами в дендрохронологических шкалах. Дендроиндикация естественных и антропогенных изменений ПК позволяет изучить состояние и динамику геокомплексов при ретроспективном анализе и может быть использована для прогнозирования возможных изменений природной среды. Поэтому при оценке воздействия внешних факторов на геосистемы, которые будут отражены в величине

прироста годичных колец, предлагается использование термина «дендроиндикация», в случаях применения методики дендрохронологического датирования отдельных природных явлений и процессов, а также исторических реалий с применением ДХШ – «дендрохронология».

**1. Материалы и методы дендрохронологических и дендроиндикационных исследований.** Материалом для дендрохронологических исследований, проводимых нами в Восточной Фенноскандии (Кольский п-ов и Карелия), преимущественно служили хвойные породы деревьев. Это связано с особенностями строения сезонных слоев их древесины: ранней – весенне-летней (светлый слой) и поздней – летне-осенней (темный слой). Ранняя древесина, рассматриваемая под микроскопом, отличается крупными клетками с тонкими перегородками, а поздняя – мелкими, уплотненными клетками с толстыми перегородками.

В наших исследованиях модельные деревья представлены: сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), елью европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), можжевельником обыкновенным (*Juniperus communis* L.). В отдельных случаях с целью определения возраста господствующего древостоя отбирались образцы с лиственных пород деревьев: берез, вязов, лип.

Интерпретация дендрохронологических данных достаточно сложна, однако комплексный анализ множества материалов позволяет решать вопрос о согласованных изменениях радиального прироста деревьев с внешними условиями, важнейшими из которых являются показатели тепло- и влагообеспеченности среды обитания (воздуха и почвогрунтов). Деревья, отражая в приросте годичных колец древесины различные изменения природной среды (естественные и антропогенные), обладают уникальными свойствами естественных мониторов. Главное преимущество изучения годичного радиального прироста деревьев заключается в возможности получения достаточно длинных рядов данных на основе ретроспективного анализа ширины годичных колец древесины. Датирование событий, повлиявших на изменение прироста соответствующего слоя, возможно с точностью до года или даже сезона.

Методы и приемы проведения дендрохронологических работ обычно определяются целями и задачами, поставленными исследователем. Для датировки каких-либо естественных и антропогенных явлений или процессов, а также для определения возраста объектов, имеющих в своей конструкции древесину, необходимо получить в дендрохронологической реализации реперные точки, которые будут способствовать «привязке» других данных к полученной шкале. Такими реперами могут быть древесные кольца с экстраминимальными годовыми приростами, кольца, несущие следы пожаров или других повреждений, проявляющиеся во всех рядах. Задача дендрохронологии в практическом плане заключается в том, чтобы дать исследователю инструмент, «линейку» для вычисления необходимых периодов.

Для дендрохронологических исследований нами отбирались модельные деревья, не имеющие значительных визуальных повреждений. При этом учитывались следующие принципы:

1) массовый отбор образцов на пробных площадках, которые обычно закладываются в однородных по составу, возрасту и полноте древостоях, в однотипных лесах и местообитаниях;

2) выборочный отбор проб с отдельных деревьев, особенно выделяющихся бóльшим диаметром ствола, или деревьев с местообитаний, где особенно сильно влияют факторы, угнетающие прирост, например, на болотах, скальниках, песчаных и галечных пляжах, на высотных границах распространения лесной растительности и т. п.

При дендроиндикационных исследованиях кроме нормально развивающихся насаждений использовалась древесина с поврежденных деревьев или имеющая признаки влияния неклиматических факторов. В таком случае необходимо определить характер и степень повреждений, повлиявших на прирост годичного кольца. К неклиматическим факторам можно отнести пожары (если они были антропогенного характера), лесную мелиорацию, плодоношение деревьев, влияние высоких или низких уровней водоемов и грунтовых вод в результате строительства водохранилищ или дорожного полотна, повреждения камбия деревьев волнами и льдом, нападения энтомовредителей и т. п.

Детальное описание методики выбора и закладки пробных площадок представлено в работе Т. Т. Битвинскаса [1974]. Отбор пробы (дендрохронологического образца – ***керна***) производится

возрастным буравом Пресслера, с длиной рабочей части в зависимости от диаметра стволов основного древостоя, от 30 до 55 см. Дендрохронологический образец обычно (по методике, предложенной Т. Т. Битвинскасом) отбирают на высоте 130 см от основания ствола (на высоте груди), однако мы в своих исследованиях придерживались методики отбора керна на высоте 15–20 см от корневой шейки ствола дерева. При этом получалась наиболее полная реализация годичных колец – практически с начала роста дерева, таким образом «потери» составляли не более 5-6 лет (рис. 1, 2).

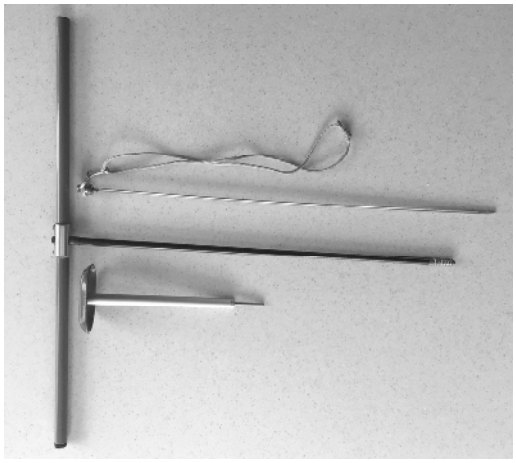


**Рис. 1.** Возрастной бурав Пресслера

**Fig. 1.** Pressler borer



**Рис. 2.** Дендрохронологические образцы – керны

**Fig. 2.** Dendrochronological samples – cores

В исключительных случаях применяется способ отбора дендрообразцов в виде спилов: дисков, секторов, призм [Ловелиус, 1979]. Их можно получать в местах плановых лесозаготовок (на делянках), с пней спиленных деревьев. Древесные диски или их фрагменты лучше всего отрезать ножовкой с мелкими зубцами, например с исторической древесины, погребенной в торфяных толщах, или с деревянных конструкций мостов, дамб и других сооружений. Диски и сектора более удобны при проведении дендрохронологической обработки и расчетов, так как лучше виден радиус наибольшего прироста, выпадающие (неполные) кольца, креневые или тяговые кольца, повреждения и т. п., а также появляется возможность наблюдения последнего кольца, по которому определяется год заготовки древесины.

Для лучшего просмотра годичных колец, если есть в этом необходимость, проводится предварительная подготовка образцов – их можно аккуратно отшлифовывать (если древесина плотная), смачивать глицерином, покрывать древесным лаком для лучшего просмотра – однако следует помнить, что любое воздействие на древесину может нарушить мелкую текстуру годичных колец и измерения будут некорректными. Просмотр и подсчет прироста годичных колец проводится с использованием лупы-измерителя (в полевых условиях – для получения первичной информации), бинокулярного микроскопа, например МБС-10 (с линейкой на окуляре) или стереоскопического микроскопа OPTICA SZ-2 с фотоаппаратом на окуляре. Это позволяет использовать его в сочетании с компьютерной программой OPTICA Vision 3.6 для передачи фотографии прямо с микроскопа на дисплей компьютера и проводить соответствующие замеры. Также можно применить методику обработки образцов и получить изображение кернов и дисков с применением высокоточного сканера (от 1200 до 3200 dpi). Керны зажимаются по всей длине в специальной струбцине и срезаются вдоль острым инструментом для получения плоской поверхности, что способствует лучшему прижиманию в сканере. Полученное изображение калибруется в соответствии с программой OPTICA Vision 3.6 на стадии сканирования, что дает возможность производить измерения ширины годичных колец с точностью до 0,1–0,05 мм.

При интерпретации полученных дендрохронологических рядов одной из основных проблем является стандартизация натуральных данных. Это связано с тем, что годичные кольца деревьев могут иметь различные амплитуды приростов в разные периоды жизни. Чтобы выровнять морфологически обусловленные различия данных натуральных рядов, используют разнообразные методы

приведения их к индексам. Метод расчета индексов радиального прироста получил широкое распространение в различных дендрохронологических школах, поскольку он достаточно объективно, исключая фактор возраста и давая независимые от него величины, отражает влияние комплекса остальных факторов, главным образом климатических. В дендрохронологических работах индексирование натуральных рядов вполне приемлемо, так как оно учитывает все отклонения от средней величины прироста годичных слоев, что приводит разные ряды к стандарту.

При дендроиндикационных же исследованиях такое нивелирование, наоборот, может дать материал для неверных или неточных выводов. В отдельных случаях требуется учитывать весь спектр изменений хода прироста, когда происходят не только годовые, но и внутри- и сверхвековые колебания всей кривой. У деревьев, растущих в пессимальных условиях, обычно слабо выражены годичные кольца как в молодой, так и в стареющей фазе роста. Средняя норма прироста у многих деревьев имеет волнообразный вид и не отражает тенденций изменения темпов роста с возрастом. В этом случае удобно использовать расчет по методу «коридора», предложенный С. Г. Шиятовым [1986], который отвечает многим критериям, предъявляемым к дендроиндикационным исследованиям. Для деревьев, произрастающих в пессимальных условиях, период максимальных возрастных приростов наступает поздно, поэтому метод расчета индексов по «коридору» дает возможность сохранить участки центровых годичных колец, образовавшихся до момента наступления возрастного максимума, который нередко в практике не учитывается.

При расчете индексов прироста во внимание берется пространственное положение точек в пределах «коридора». Для упрощения расчетов его ширина принимается равной 200 %. Тогда индексы прироста будут изменяться в пределах от 0 до 200 %.

Вычисления индексов прироста производились по формуле:

$$I = \frac{l_{fact} - l_{min}}{l_{max} - l_{min}} \cdot 100,$$

где I – индекс прироста, $l_{fact}$ – ширина годичного кольца, $l_{min}$ – расстояние между осью абсцисс и минимальной кривой, $l_{max}$ – расстояние между осью абсцисс и максимальной кривой.

Преимуществами метода «коридора» являются [по: Шиятов, 1986]:

1) наглядность и верность, или правильность (точность) отбора моделей;

2) возможность выявлять не только кратковременные (внутривековые), но и длительные (вековые и сверхвековые) климатически обусловленные колебания прироста;

3) в рядах индексов прироста отсутствует неоднородность, связанная с изменением темпов прироста в течение жизни дерева, поскольку индексы изменяются в строго ограниченном диапазоне (от 0 до 100 %) независимо от того, был прирост высоким или низким;

4) длительность исходного временного ряда не сокращается;

5) сложных расчетов при проведении кривых и вычислении индексов прироста не требуется.

Недостатками этого способа являются некоторая неопределенность и субъективизм при построении кривых максимально и минимально возможного прироста. Однако роль этих факторов можно свести к минимуму при условии построения обобщенного ряда данных из достаточного количества моделей.

Необходим внимательный просмотр образцов древесины на предмет выявления особо широких годичных колец, состоящих из *креневой*, *тяговой* и *раневой* древесины.

Пример расчета индексов по методу «коридора» представлен на рис. 3 и 4. На первом графике хорошо заметны глубокие депрессии и высокие пики, имеющие длительный период проявления, до нескольких десятилетий. Это объясняется сильным и долговременным воздействием какого-либо внешнего фактора. Но при этом мы видим и «возрастную кривую», которая на самом деле не отражает снижения физиологических функций дерева, так как площадь годичного кольца в областях молодой и старой древесины может быть одинаковой. Данное проявление указывает лишь на то, что дерево и в молодом, и в зрелом возрасте жило в одинаковых условиях. А наблюдаемые в графике депрессии или пики идентифицируются как воздействие внешнего фактора. На втором графике хорошо заметны сохранившиеся основные периоды депрессий и пиков приростов годичных колец. Ценность такого подхода и состоит в том, что точность показателей именно по годам и соответствующим периодам не меняется.




**Рис. 3.** Графики кривых максимально и минимально возможного прироста, проведенные для расчета индексов прироста по методу «коридора». Абсолютные значения прироста модельного дерева

**Fig. 3.** Plots of the maximum and minimum possible increment curves drawn to calculate increments using the "corridor" method. Model tree absolute increment values

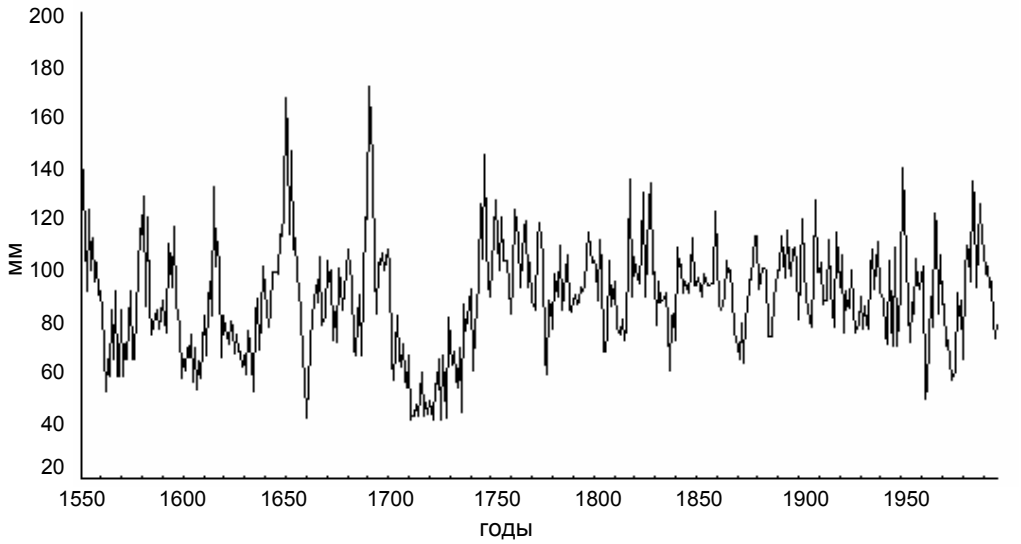



**Рис. 4.** График, построенный по индексам, вычисленным методом «коридора». Индексы модельного дерева

**Fig. 4.** Plot based on indices calculated by the "corridor" method. Model tree indices

При дальнейшем анализе дендрохронологических образцов обычно применяются стандартные методы статистической обработки длинных рядов данных: сглаживание с различным шагом скольжения, спектральный, кросскорреляционный и автокорреляционный анализы и др. Кроме того, осуществляются визуальное сравнение и синхронизация полученных данных при наложении двух кривых – одна на другую. Такой путь имеет преимущество перед иными количественными методами своей возможностью учитывать весь ход и рисунок кривой, со всеми характерными для данного графика последовательностями спадов и подъемов прироста. Визуальный метод перспективен в том случае, если четко проявляется действие лимитирующего фактора в виде угнетенных или аномально больших приростов годичных колец. Для уточнения характеристик дендрохронологических рядов применяется

метод перекрестного датирования для групп образцов одного местообитания. В первую очередь эталоном для перекрестного анализа служили высоковозрастные образцы, а также ряды, полученные с исторической и ископаемой древесины.

**2. Основные научные области дендрохронологических и дендроиндикационных исследований.** Дендрохронология разделяется на множество научных областей, которые исследуют один или более аспектов использования данных прироста древесных колец:

1) дендроклиматология – наиболее старая и, вероятно, также наиболее широко изученная область дендрохронологии, которая исследует ширину, плотность и другие характеристики годового прироста деревьев в конкретном районе с целью определения хронологии изменчивости ширины древесных колец для этого места. С ее помощью реконструируют как годовые, так и сезонные климатические изменения. Дендроклиматические и палеодендроклиматические исследования проводятся как отечественными, так и зарубежными учеными [Ловелиус, 1966, 1970; Адаменко, Ловелиус, 1968; Максимов, Гребенюк, 1972; Fritts, 1976; Вессарт, 1978; Hughes et al., 1982; Brubaker, Cook, 1983; Briffa et al., 1990, 1995; Cook, Kairiukstis, 1990; Eronen et al., 1994; Lindholm, 1996; Ваганов и др., 1997, 1998 и др.];

2) дендрогеоморфология – применение датированных древесных колец для определения времени проявления геоморфологических процессов, например, вулканической деятельности, землетрясений, схода селевых потоков, оползней, образования дюн и береговых форм рельефа [Ловелиус, 1970; Логинов, Кравчук, 1986; Heikkinen, 1987; Jacoby et al., 1988; Гриппа, 2014];

3) дендрогляциология – применение датированных древесных колец для анализа динамики ледников [Адаменко, 1968; Максимов, 1974];

4) дендрогидрология – применение данных ширины древесных колец для изучения гидрологических процессов, например, изменения потоков рек, уровней озер, истории наводнений [Рудаков, 1953; Галазий, 1967; Ларин, 1988; Гриппа, 1997, 2014];

5) дендропирохронология – применение хронологии прироста древесных колец для подтверждения или определения истории лесных пожаров [Карбаинов, Моложников, 1986];

6) дендроархеология (дендроистория) – система научных методов определения точного диапазона времени, в течение которого лес был повален, перемещен, обработан и использован для конструкций, построек [Вихров, Колчин, 1962; Колчин, 1962; Колчин, Черных, 1977; Яскеляйнен, Козлов, 1993; Гриппа, 1997, 2014; Быков, 2009];

7) дендроэкология – область дендрохронологии, которая охватывает все области использования датирования по кольцам деревьев, в целях изучения экологических проблем и среды местообитания растительных сообществ, например: климата, побережий водных объектов, форм поверхности Земли, движений ледников, снега, тектонических процессов, пирогенного воздействия, динамики лесных ландшафтов и антропогенных воздействий [Jacoby, Hornbeck, 1987; Fritts, Swetnam, 1989]. Сюда же можно отнести и влияние колебания солнечной активности на прирост древесины [Молчанов, 1970; Stocton et al., 1985; Битвинскас, 1986; Kocharov, 1990; Гриппа, Потахин, 2016], исследование биотического повышения атмосферного CO [La Marche et al., 1986; Kienast, Luxmoore, 1988], изотопный анализ дендрообразцов [Pilcher, 1990; Lewis, 1995].

На протяжении исторического периода параметры климатической системы – гелиостационарная орбита Земли, размещение и соотношение площадей суши и океана, размеры материковых ледниковых покровов, рельеф суши и морского дна, общая циркуляция атмосферы и состав биосферы – незначительно отличались от современных, что позволяет достаточно корректно использовать сведения о прошлом состоянии различных природных комплексов и климатических данных для прогноза на ближайшее будущее – на первые десятилетия XXI в. Под историческим периодом понимается время, охватываемое документальными данными. На территории Восточной Фенноскандии письменные и устные исторические источники ограничивают временные рамки вторым тысячелетием нашей эры [История Карелии..., 1993].

Непосредственным предметом наших исследований являются дендроиндикация изменений природных условий Восточной Фенноскандии, а также дендрохронологическое датирование историко-географических событий и артефактов. Проведение дендрохронологических исследований обусловлено необходимостью ретроспективного анализа гидрометеорологических данных и выявления антропогенных воздействий на природные комплексы.

Для построения дендрохронологических шкал и анализа нами использовались дендрообразцы, полученные в результате собственных полевых исследований на протяжении 1991–2018 гг., а также взятые из литературных источников [Битвинскас, 1974; Битвинскас, Кайратис, 1978; Вессарт, 1978]. Объект исследований представлен преимущественно естественными древостоями территории Восточной Фенноскандии, т. е. дендрохронологическими и дендроиндикационными исследованиями были охвачены таежные подзоны Карелии и Кольского полуострова (в пределах лесных геокомплексов зональной и вертикальной поясности), в том числе в природоохранных территориях: Национальный парк «Паанаярви», ландшафтные заказники «Толвоярви», «Великий Андомский водораздел», «Муромский», «Тулокский» и «Заозерский», музей-заповедник «Кижи» и др.

Во время последующего анализа нами решались следующие задачи: существует ли закономерная связь в пространственно-временной изменчивости природных условий, процессов и явлений отдельных геокомплексов Восточной Фенноскандии между собой; есть ли ритмика в приросте годичных колец; возможно ли, зная закономерности циклических колебаний рядов дендроданных, реконструировать природные условия исследуемой территории на период, охватываемый возрастом древостоев и ископаемой древесины. Кроме того, мы сделали оценку – как изменялись климатические параметры исследуемой территории для временных масштабов существенно бóльших, чем это возможно установить по инструментальным гидрометеорологическим данным.

Полученные результаты позволили сделать выводы о наличии закономерных колебаний природных условий как в локальных, так и в зональных геокомплексах разных таксономических рангов [Гриппа, Потахин, 2016]. По данным дендроиндикации установлена возможность оценивать естественные и антропогенные изменения на уровне фаций и урочищ при проведении ландшафтных исследований. Кроме того, осуществлена датировка природных и антропогенно обусловленных процессов и явлений: образование береговых валов, дюн и уровенный режим Онежского и Ладожского озер за период XVI–XIX вв., не охваченный инструментальными наблюдениями, исторических объектов – это гатевые сооружения исторической трассы Петра I – «Осударева дорога», построенной в 1702 г., солеварни Белого моря – в 1685 г., блиндажи периода Второй мировой войны – в 1943 г., выброшенное штормом в 2009 г. на побережье Ладожского озера деревянное судно – затонуло более 100 лет назад, было построено из древесины, спиленной в 1874 г. (рис. 5), и многое другое.

Для установления динамики естественных и антропогенных процессов прибрежных геокомплексов крупных водоемов Восточной Фенноскандии с применением методов дендроиндикации в 1995–2010 гг. были проведены полевые исследования по сбору и анализу дендрохронологических образцов в сосновых *(Pinus sylvestris* L.*)* и еловых *(Picea abies* L.*)* древостоях, произрастающих вблизи Онежского озера и на его островных территориях. В 2010 г. в рамках экспедиции по программе Русского географического общества «Историко-географические памятники Европейского Севера России» были получены уникальные материалы, подтверждающие существенные изменения высоты уровня воды в Онежском озере за прошедшие столетия. При проведении исследований в районе Муромского ландшафтного заказника, к северу от устья р. Муромки (500 м) были обнаружены остатки деревьев, находящихся в прибрежной зоне – на глубине 0,5 м. Они представляют собой обломанные пни сосен, основной корень которых уходит глубоко в грунт, а боковые корни широко раскинуты в стороны, следовательно, исключается возможность того, что они были перемещены в результате каких-либо волноприбойных процессов (рис. 6). Эти остатки затопленных пней были описаны



**Рис. 5.** Старинное судно, выброшенное на берег Ладожского озера в 2009 г.

**Fig. 5.** An old ship washed onto Lake Ladoga shore in 2009

еще Д. Д. Квасовым и Б. И. Кошечкиным [1990]. С трех таких артефактов нами были отобраны спилы в виде секторов (рис. 7), которые подверглись анализу уже в лабораторных условиях. В дальнейшем при проведении исследований первых реликтовых береговых валов данного ключевого участка были обнаружены остатки стволов сосен, погребенных под слоем озерных отложений. С них также отбирались дендрохронологические образцы в виде спилов (рис. 8).



**Рис. 6.** Пень сосны, с которого был отобран образец на анализ

**Fig. 6.** Pine stump from which a sample was taken for analysis



**Рис. 7.** Дендрохронологический образец в виде сектора, полученный из пня сосны

**Fig. 7.** Dendrochronological specimen in the form of a sector taken from the pine stump

Дендроиндикационным исследованиям на побережьях озер и рек, а также определению влияния режима водоемов на прирост древесины посвящено немало работ [Рудаков, 1953, 1964; Нарышкин, 1961; Галазий, 1967; Alestalo, 1971; Ларин, 1988; Brinkmann, 1992 и др.]. На территории Восточной Фенноскандии работы по изучению колебания уровня воды озер, в том числе Онежского, с применением методов дендроиндикации проводились впервые. Деревья, с которых в виде кернов нами отбирались образцы, произрастают в различных природных комплексах: на урезах воды, береговых валах, озерных террасах, скальных выходах кристаллических пород и т. д., расстояние от берега не превышает 500 м. Полигоны модельных деревьев находятся в пределах северного, западного и восточного побережий и островных территорий Онежского и Ладожского озер.



**Рис. 8.** Получение дендрохронологического образца из ископаемой сосны: основание первого реликтового берегового вала в районе юго-восточного побережья Онежского озера, устье р. Муромки

**Fig. 8.** Taking a dendrochronological sample from a fossil pine: the base of the first relict levee near the southeastern shore of Lake Onego, River Muromka mouth

Анализ ширины годичных колец показал, что для отдельных образцов характерна зависимость прироста древесины от изменения уровня воды. Это хорошо проявляется в случаях произрастания древесных насаждений на берегу озера, в условиях недостатка влаги в почве или, наоборот, ее избытка при подтоплении корневой системы. Наиболее яркими примерами зависимости прироста от изменения уровня воды являются образцы сосен, которые растут на первых реликтовых береговых валах, сложенных мелкой и средней галькой, а также на абразионно-аккумулятивных озерных террасах, с выходами коренных пород.

Результат анализа показал, что сосны, растущие на песчаных, хорошо дренируемых примитивных почвах, вблизи заболоченного понижения, которое удалено от озера на 150–250 м,

но имеющего связь с водоемом посредством водоносных слоев грунта, чутко реагируют на колебания уровня воды данного озера. Очевидно, что грунтовые воды, питающие низинное болото, влияют на изменение величины прироста годичных колец: при увеличении уровня воды в озере возрастает радиальный прирост годичных колец, т. к. повышается уровень болотных вод и растущие вблизи, на песчаных грядах, сосны реагируют увеличением прироста древесины. Такая закономерность отмечена у деревьев, произрастающих в основании береговых валов и песчаных дюн юго-восточных побережий Онежского и Ладожского озер. Таким образом, исследованные деревья откликаются на колебания воды в озере увеличением или уменьшением прироста, т. е. существует прямая зависимость радиального прироста древесины от уровня водоема. Коэффициенты корреляции изменения ширины годичных колец для исследованных образцов с уровнем воды озера составляют |0,65|–|0,80|. При совмещении отдельных периодов прироста древесины (раннего или позднего возраста дерева) с таким же периодом колебания уровня воды озера отмечается синхронность в ходе кривых и коэффициент корреляции увеличивается до |0,90|. Например, в 1940 г. отмечен самый низкий показатель водного горизонта в Онежском озере за наблюдаемый период. В этот же год формируется самое тонкое кольцо у модельного дерева залива Заячья губа, при среднем приросте 1,37 мм ширина слоя составила 0,15 мм (рис. 9).

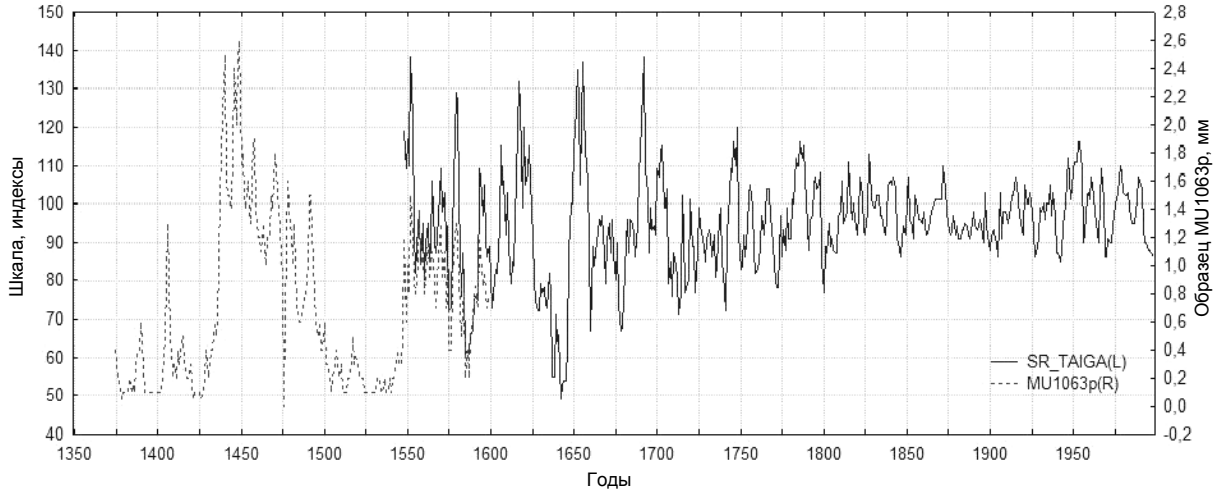



**Рис. 9.** Перекрестное датирование «плавающей» кривой годовых приростов, полученных с дендрохронологического образца из затопленного пня на дендрохронологическую шкалу по среднетаежным сосновым древостоям Карелии

**Fig. 9.** Cross-dating of the "floating" curve of annual increments obtained from a dendrochronological sample from a submerged stump against the dendrochronological scale for middle-taiga pine stands of Karelia

Корреляционный анализ колебания прироста годичных колец деревьев, растущих в непосредственной близости от воды, с изменением уровня водоема дал нам возможность ретроспективно восстановить уровенный режим того периода, на который отсутствуют гидрологические данные. Применяя дендрохронологический метод, можно установить время укоренения древостоя на образовавшемся береговом валу после понижения среднего уровня воды в озере. По мнению Г. И. Галазия [1967], древесные растения поселяются на галечных береговых валах и пляжах через 10–15 лет после их образования. Мелкозернистый субстрат, песок, суглинок заселяются деревьями обычно в течение 2–5 лет. Поэтому, анализируя образцы с первого реликтового вала, из залива Заячья Губа Онежского озера, мы получили следующие результаты: первый береговой вал образовался не позднее 1825–1828 гг., средний уровень воды в этот период был на 0,4–0,5 м выше современного среднего. Второй береговой вал, который отстоит в этом районе от уреза воды на 10–12 м, мог сформироваться в начале 1590-х гг. Подъем воды повлиял на прирост модельных деревьев, укоренившихся в 1520-е гг., и, учитывая их местоположение, получается, что средний уровень Онежского озера в конце XVI в. был еще выше на 1,8–2,0 м. Ход колебания уровня воды в разных частях озера согласованный, ему соответствуют время образования береговых валов и высота уреза воды в прошедшие столетия.

Дальнейший кросскорреляционный анализ показал полную идентичность образцов затопленных пней и погребенных в реликтовом валу стволов сосен, что подтвердило гипотезу их местного происхождения. Вероятно, деревья были сломаны во время сильных штормов и вынесены на пологий пляж, на котором позднее образовался береговой вал высотой 1,8–2,2 м над современным уровнем воды.

С учетом данных исследований и произведенного анализа был сделан вывод о достаточно низких уровнях воды Онежского озера в период произрастания модельных деревьев. В результате были получены даты укоренения и гибели модельных деревьев, что позволяет установить период низкого уровня воды Онежского озера и время начала ее подъема. Таким образом, можно с большой степенью уверенности утверждать, что в 1370-е годы уровень Онежского озера был не менее чем на 0,3–0,5 м ниже современного, а возможно, и больше. Об изменениях среднего уровня воды в озере еще в доисторическую эпоху есть данные исследований, представленные Г. А. Панкрушевым [1978, 1990], который считает, что они обусловлены не только изменением климатических условий, но и гляциоизостатическим поднятием северного Прионежья.

В последующие века уровень воды в озере поднимался и достиг высоты 1,8–2,0 м от современного в конце XVI в. Доказательством высокого уровня воды Онежского озера в XIV–XVI вв. может быть упоминание в Писцовой книге Заонежской половины Обонежской пятины (1582–1583) о том, что Муромский монастырь на юго-восточном побережье озера во время своего возникновения, в XIV в., находился на острове Муромском [Энциклопедический словарь…, 1906; История Карелии..., 1993, с. 263]. Используя дендрохронологический метод, было точно определено время строительства самой старой из известных культовых построек на северо-западе России, располагавшейся на территории монастыря, – церкви Лазаря Муромского. Древесина для сруба заготавливалась в 1520 г. [Zettenberg, 1990]. Таким образом, строительство церкви соответствует времени, когда территория застройки находилась на острове, что согласуется с историческими свидетельствами и полученными в наших исследованиях. Строения монастыря располагаются на возвышенном участке перешейка между Онежским и Муромским озерами, которые соединяются короткой рекой-протокой. Побережье Муромского озера заболоченное, а перешеек сложен озерными песками, которые переоткладываются эоловыми процессами, образуя дюны. На их вершинах сформировались редкостойные сосновые леса, возраст которых составляет 200–240 лет. Таким образом, можно утверждать, что перешеек между озерами сформировался после начала снижения уровня воды в Онежском озере, не позднее середины XVIII в. Образцы, отобранные с сосен, произрастающих на втором реликтовом береговом валу, который отстоит на 20–25 м от современного уреза воды в районе восточного побережья озера, имеют возраст около 240 лет. Сопоставление прироста древесины с этих моделей с данными ширины годичных колец, полученных с деревьев противоположного, западного побережья Онежского озера, дает основание считать, что существует закономерность в ходе динамики роста сосен прибрежных геокомплексов и что исследованные деревья подвергались воздействию изменения уровня водоема если не в прямой связи, то опосредованно, через грунтовые воды.

Полученные реконструкции колебания среднего уровня воды Онежского озера начала XVI в. согласуются с данными А. В. Шнитникова [1968, с. 182, 191]. Он указывает на то, что на протяжении XIV–XVI вв. отмечалось длительное увеличение общей увлажненности, по крайней мере, в северном полушарии. Изменение климатических условий привело к резкому и значительному повышению уровня водоемов, в том числе и бассейна Ладожского озера [Шнитников, 1968]. В рассматриваемый период для акватории Балтийского моря были характерны частые штормы, разрушающие дамбы, изменяющие конфигурацию береговой линии. Возникновение мощных береговых валов Онежского озера, датированных нами 80–90-ми годами XVI в., связано, вероятнее всего, со штормами данной эпохи. Особенно велики эти валы в юго-восточной части озера: в районе устьев рек Муромки, Андомы, Кука-реки. Подобные процессы в указанный период происходили и на восточном побережье Ладожского озера. Об этом свидетельствуют реликтовые береговые валы, дюны и дендрохронологические данные, полученные с останцов деревьев, которые засохли прямо на корню, в процессе прохождения над ними перевиваемых песков. Период произрастания засохших деревьев точно установить не удалось ввиду плохой сохранности внешних колец. Однако, учитывая сходство восточных побережий Ладожского и Онежского озер, можно

предположить, что дюны обеих территорий образовывались синхронно. После регрессии озер – в конце XIV в., в результате дефляции обнажившихся побережий, стали формироваться дюны, которые ныне протягиваются грядами, параллельными береговой линии. Наиболее высокие дюны сейчас имеют высоту 16 м над уровнем озера (рис. 10). Полученные нами с помощью дендроиндикационных методов результаты изменения уровенного режима Онежского озера согласуются с данными Ё. Алестало по озерам Финляндии [Alestalo, 1971].




**Рис. 10.** Профиль дюны и реликтовых береговых валов на восточном побережье Онежского озера, в районе устья р. Муромки

**Fig. 10.** Profile of the dune and relict levees at the eastern shore of Lake Onego, near the mouth of River Muromka

**3. Основные научные принципы дендрохронологических и дендроиндикационных исследований.** На основе изложенных выше методов и приемов проведения дендрохронологических работ на международных конференциях и семинарах по проблемам дендрохронологии были сформулированы единые принципы дендрохронологических исследований. Это стало необходимым для того, чтобы унифицировать информацию о приросте годичных колец, получаемую специалистами в дендрохронологии в разных районах Земли. В своих полевых и лабораторных исследованиях, при анализе дендрохронологических рядов и расчете индексов прироста древесины необходимо придерживаться следующих принципов.

*Принцип однообразия* – заключается в том, что физические и биологические процессы, которые связывают текущие изменения окружающей среды с современными образцами прироста дерева, по-видимому, действовали в прошлом [Fritts, 1976]. «Настоящее – ключ в прошлое» – этот принцип первоначально был установлен Дж. Хаттоном в 1785 г. Тем не менее дендрохронология дополняет этот принцип: «Прошлое – ключ в будущее». Зная внешние условия, которые существовали в прошлом (определенные на основе анализа древесных колец), мы сможем лучше прогнозировать тенденцию изменения климата в будущем. Следовательно, зная, какой прирост древесины был при климатических условиях в XX столетии, мы можем восстановить климат по кольцам деревьев за период до инструментальных наблюдений и оценить возможное поведение природных динамических систем в перспективе.

*Принцип лимитирующего фактора* – проявляется в том, что при всех благоприятных условиях для роста дерева достаточно одного фактора, находящегося в пессимуме в определенный период, чтобы это проявилось в последовательности годичных колец в виде минимумов прироста. Этот принцип как раз и является основополагающим при дендроиндикационных исследованиях.

*Принцип совокупности факторов измерения радиального прироста деревьев* заключается в том, что любая индивидуальная серия прироста годичных колец дерева может быть разложена на составные части соответственно показателям окружающей среды. Факторы могут быть как природные, так и антропогенные. Например, прирост кольца дерева в течение определенного года зависит от совокупности показателей:

1) с возрастом прирост годичных колец уменьшается, что связано с нормальным физиологическим процессом старения, а также с увеличением диаметра ствола деревьев, при относительно небольших колебаниях биомассы, которая накапливается в древесных кольцах;

2) периоды семеношения, которые бывают в более благоприятные годы, но в сериях годичных колец могут проявиться в виде снижения прироста, так как часть биомассы расходуется на семена;

3) климатические воздействия, которые проявлялись в течение этого года;

4) случайные нарушения на стволах деревьев (например, повреждения коры деревьев в результате антропогенного воздействия);

5) влияние на лесные древостои различных биотических факторов (например, популяционный взрыв численности паразитирующих на деревьях насекомых, которые вызывают уменьшение прироста);

6) субъективные ошибки в последовательности приростов годичных колец, которые могут возникать на любом этапе дендрохронологических работ.

Следовательно, для того, чтобы получить объективный и точный отклик окружающей среды в приросте древесины, перечисленные факторы должны быть учтены и сведены до минимума. Выбирать деревья и местообитания необходимо так, чтобы уменьшить возможность воздействия перечисленных факторов, влияющих на прирост дерева.

*Принцип экологической валентности* проявляется в том, что различные виды деревьев будут по-разному чувствительны к экологическим фактором. Можно выделить древостои с широкой и узкой экологической валентностью, т. е. имеющие большой ареал расселения и широкий спектр приспособленности к среде обитания или способные жить исключительно при наличии строго определенных биотических условий.

*Принцип выбора местоположения* состоит в том, что необходимые для исследований дендрохронологические материалы отбираются с деревьев наиболее чувствительных к экологическим факторам в условиях, когда древостои произрастают в пессимальных для них условиях.

Применение *принципа перекрестного датирования* дает возможность определять совпадение приростов (плотности) древесины колец двух или нескольких дендрохронологических рядов, идентифицированных точно по годам.

*Принцип повторения* определяет необходимость отбора множества дендрохронологических образцов из одного местообитания и от разных деревьев. Этот принцип основывается на том, что каждое дерево обладает собственными физиологическими особенностями и не всегда может отражать полученный извне сигнал, повлиявший на изменение прироста годичного кольца. Поэтому многочисленные образцы гарантируют подавление «шума» в усредненной реализации рядов годичных колец.

**Заключение.** Использование дендрохронологических методов индикации влияния природных и антропогенных факторов позволяет достаточно объективно оценить силу и время (период) этих воздействий. Дендроиндикация как область дендрохронологии может представлять собой и вполне самостоятельную дисциплину, дающую ключ к пониманию природных явлений и процессов, и вспомогательную – для специалистов, исследующих временные состояния геокомплексов, испытывающих природные и антропогенные воздействия. Неоценима роль дендрохронологии и дендроиндикации при выявлении закономерностей климатических флуктуаций, для решения ряда научных и практических задач в областях экологии, гидрологии, гляциологии, геоморфологии, археологии и исторической географии.

П о н я т и я . Дендрохронология, дендроиндикация, дендрогидрология, дендрогеоморфология, природные комплексы, палеогеография, историческая география, реперные события, методы индексирования.

## Вопросы для самоконтроля

1. Чем принципиально отличаются дендрохронологические исследования от дендроиндикационных?

2. Почему при дендроиндикационных исследованиях удобнее использовать метод «коридора», нежели другие методы индексирования?

3. Что такое реперные события и как они отражаются в последовательности приростов годичных колец?

4. Почему важно знать и учитывать основные принципы дендрохронологических и дендроиндикационных исследований?

## Литература


*Адаменко В. Н.* Использование дендрохронологических данных в гляциологических исследованиях: Материалы Всесоюзного совещания по вопросам дендрохронологии и дендроклиматологии. Вильнюс, 1968. С. 17–21.

*Адаменко В. Н., Ловелиус Н. В.* Использование дендрохронологических данных для изучения многолетней изменчивости метеорологических условий последнего тысячелетия: Материалы Всесоюзного совещания по вопросам дендрохронологии и дендроклиматологии. Вильнюс, 1968. С. 30–35.

*Битвинскас Т. Т.* Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 172 с.

*Битвинскас Т. Т.* Опыт использования реперной системы солнечной активности для изучения закономерностей изменчивости радиального прироста деревьев // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 174–186.

*Битвинскас Т. Т., Кайратис И. И.* Дендрохронологические шкалы сосны (*Pinus sylvestris* L.) дендроклиматологического профиля Мурманск – Карпаты // Дендрохронологические шкалы Советского Союза. Каунас, 1978. С. 52–69.

*Быков А. П.* Дендрохронологическая датировка хозяйственной деятельности населения Беломорья // Адаптация культуры населения Карелии к особенностям местной природной среды периодов мезолита – Средневековья. Гуманитарные исследования. Вып. 4 / ред. М. Г. Косменко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 192–198.

*Ваганов Е. А., Панюшкина И. П., Наурзбаев М. М.* Реконструкция летней температуры воздуха в восточной части Таймыра за последние 840 лет // Экология. 1997. № 6. С. 403–407.

*Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Хантемиров Р. М., Наурзбаев М. М.* Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: Сравнительный анализ данных годичных колец деревьев и ледовых кернов // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358, № 5. С. 681–684.

*Вессарт В. В.* Некоторые результаты дендрохронологических исследований на северо-западе Кольского полуострова // Изв. ВГО. 1978. Т. 110, вып. 5. С. 446–450.

*Вихров В. Е., Колчин Б. А.* Основы и метод дендрохронологии // Советская археология. 1962. № 1. С. 95–112.

*Галазий Г. И.* Динамика роста древесных пород на берегах Байкала в связи с циклическими изменениями уровня воды в озере // Геоботанические исследования на Байкале. М., 1967. С. 44–301.

*Гриппа С. П.* Дендрохронологический анализ и колебания уровня крупнейших озер Европы // Изменения климата Восточной Фенноскандии и уровня воды крупнейших озер Европы / ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. С. 33–39.

*Гриппа С. П.* Естественные и антропогенные изменения природной среды Восточной Фенноскандии: Дендроиндикация / С. П. Гриппа; науч. ред. Н. В. Ловелиус. Петрозаводск: ПетрГУ, 2014. 83 с.

*Гриппа С. П., Потахин С. Б.* Периодичность соотношения тепла и влаги в таежных геокомплексах Европейского Севера России по дендрохронологическим данным // Resources and Technology. 2016. Т. 13, № 4. С. 27–44.

История Карелии в документах. III / под ред. И. Черняковой и К. Катаяла. Петрозаводск; Йоэнсуу, 1993. 510 с.

*Карбаинов Ю. М., Моложников В. Н.* Дендроиндикация периодичности возникновения лесных пожаров // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 194–199.

*Квасов Д. Д., Кошечкин Б. И.* Геоморфология береговой зоны / Онежское озеро // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР). Л.: Наука, 1990. С. 83–85.

*Колчин Б. А.* Дендрохронология Новгорода // Советская археология. 1962. № 1. С. 113–139.

*Колчин Б. А., Черных Н. Б.* Дендрохронология Восточной Европы. М.: Наука, 1977. 128 с.

*Котляков В. М., Комарова А. И.* География. Понятия и термины. Пятиязычный академический словарь: русский – английский – французский – испанский – немецкий / В. М. Котляков, А. И. Комарова; Рос. академия наук. М.: Наука, 2007. 859 с.

*Ларин С. И.* Дендроиндикация изменений уровней озер Мондинской котловины (Восточный Саян) // Изв. ВГО. 1988. Т. 120, вып. 2. С. 178–181.

*Ловелиус Н. В.* Опыт применения дендрохронологического анализа для изучения изменений климата (на примере Восточных Саян) // Герценовские чтения. XIX. География и геология: Программа и тезисы докладов. Л., 1966. С. 34–36.

*Ловелиус Н. В.* Влияние извержений вулканов на растительность Камчатки // Ботанический журнал. 1970. Т. 55, № 11. С. 1630–1633.

*Ловелиус Н. В.* К методике дендроиндикационных исследований / Изучение биогеоценозов тундры и лесотундры. Л.: Наука, 1972. С. 69–73.

*Ловелиус Н. В.* Изменчивость прироста деревьев: дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука (Лен. отд-ние), 1979. 231 с.

*Логинов В. Ф., Кравчук Е. Г.* Связь вулканических извержений с изменением климата // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 122–126.

*Максимов Е. В.* Время образования бывшего оз. Яшилкуль в хребте Кичик-Алай // Изв. ВГО. 1974. № 6. С. 506–509.

*Максимов Е. В., Гребенюк А. К.* Изменчивость природной обстановки высокогорной зоны Зеравшанского хребта за последние 800 лет // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. 1972. Вып. 2. С. 98–104.

*Молчанов А. А.* Изменчивость ширины годичного кольца в связи с изменением солнечной активности // Формирование годичного кольца и накопление органической массы у деревьев. М., 1970. С. 7–49.

*Нарышкин М. А.* Прирост ели в зависимости от уровня грунтовых вод и некоторых метеорологических факторов // Труды Лаборатории лесоведения АН СССР. 1961. Т. 3. С. 24–36.

*Панкрушев Г. А.* Мезолит и неолит Карелии. Л., 1978. Ч. 1 – 136 с.; Ч. 2 – 164 с.

*Панкрушев Г. А.* Возраст береговых образований по археологическим данным / Онежское озеро // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР). Л.: Наука, 1990. С. 87–89.

*Рудаков В. Е.* Возможность восстановления хода колебаний стока рек по годичным кольцам деревьев на примере реки Волги // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. 1953. № 4. С. 101–103.

*Рудаков В. Е.* Годичный прирост деревьев как показатель колебаний стока рек // Изв. ВГО. 1964. Т. 96, вып. 6. С. 96–98.

*Хачатуров М. А.* Дендрохронологические исследования в СССР и задачи биоклиматического мониторинга лесов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XII. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 259–265.

*Шиятов С. Г.* Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 137 с.

*Шиятов С. Г., Комин Г. Е.* Итоги дендрохронологических исследований в восточных районах страны за 1968–1982 гг. и перспективы их развития // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 3–19.

*Шнитников А. В.* Колебания климата в текущем тысячелетии и их палеогеографическое значение // Чтения памяти Л. С. Берга. VIII – XIV. 1960–1966. Л.: Наука (Лен. отд-ние), 1968. С. 172–206.

Энциклопедический словарь. Дополнительные главы. II. С.-Пб., 1906. 480 с.

*Яскеляйнен А. Т., Козлов В. А.* О повышении эффективности историко-архитектурных обследований памятников деревянного зодчества Заонежья: опыт музея «Кижи», проблемы и перспективы // Кижский вестник. № 2. Заонежье. Петрозаводск, 1993. С. 208–214.

*Alestalo J.* Dendrochronogical interpretation of geomorphic processes // Fennia. 1971. 105. 140 p.

*Briffa K. R., Bartholin T. S., Eckstein D., Jones P. D., Karlen W., Schweingruber F. H., Zetterberg P.* A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia // Nature. 1990. 346. P. 434–439.

*Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H., Shyatov S. G., Cook E. R.* Unusual twentieth-century summer warmth in a 1,000-year temperature record from Siberia // Nature. 1995. 376. P. 156–159.

*Brinkmann W.* Local tree-rings and teleconnections: Way to improve the reconsruction of lake Superior water supplies // Great Lakes Res. 1992. 18(3). P. 357–363.

*Brubaker L. B., Cook E. R.* Tree-ring studies of holocene environments. In: Wright H. E., Jr. (ed): Late Quaternary Environments of the United States, Vol. 2, The Holocene. University of Minnesota Press, Minneapolis, 1983. P. 222–235.

*Cook E. R., Kairiukstis L. A.* (eds.) Methods of dendrochronology: applications in the environmental science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990. 391 p.

*Eronen M., Zetterberg P., Lindholm M.* Climate history from tree rings in the subarctic area of Fennoscandia // The Finnish research programme on climate change. Publications of the Academy of Finland, 1994. P. 13–19.

*Fritts H. C.* Tree-ring and climate. Academic Press, London, 1976. 567 p.

*Fritts H. C., Swetnam T. W.* Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments // Advances in Ecological Research 19, 1989. P. 110–188.

*Heikkinen O.* The dendrochronology of accumulation process // Annales Academiae Scientarum Fennicae, Series A III, Geologica-Geografica 145, 1987. P. 67–77.

*Hughes M. K., Kelly P. M., Pilcher J. R., La Marche Jr. V. C.* Climate from tree-rings. Cambridge University Press, 1982. 224 p.

*Jacoby G. C., Hornbeck J. W.* Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis, August 17–21, 1986. Tarrytown, New York, 1987. 726 p.

*Jacoby G. C., Sheppard P. R., Sien K. E.* Irregular recurrence of large earthquakes along the San Andreas Fault: evidence from trees // Science. 1988. 241. P. 196–199.

*Kienast F., Luxmoore R. J.* Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric $CO_2$ levels // Oecologia. 1988. 76. P. 487–495.

*Kocharov G.* Tree Rings: A unique source of information on processes on the earth and in the spase. In: Cook E. R., Kairiukstis L. A. (eds.): Methods of dendrochronology: applications in the environmental science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990. P. 289–296.

*La Marche V. C. Jr., Graybill D. A., Fritts H. C., Rose M. R.* Carbon dioxide enhancement of tree growth at high elevations // Science. 1986. 231. P. 859–860.

*Lewis T. E.* (ed.) Tree rings as indicators of ecosystem health. CRC Press, Boca Raton, 1995. 210 p.

*Lindholm M.* Reconstructions of past climate from ring-width measurements of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at the northern forest limit in Fennoscandia. Joensuu: University of Joensuu, 1996. 169 p.

*Pilcher J. R.* Radiactive isotopes in wood. In: Cook E. R., Kairiukstis L. A. Methods of dendrochronology: applications in the environmental science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990. P. 93–96.

*Stocton W. C., Boggess W. R., Meko D. M.* Climate and tree rings. In: Hecht A. D. (Ed.): Paleoclimatic analysis and modeling. John Wiley and Sons, New York, 1985. P. 71–161.

*Zettenberg P.* Applications of tree-ring dating in architectural history and archeology in Karelia // Sessiones sectionum. Dissertationes. Historica, archaelogica et anthropologica. Congressus septimus internationalis fenno-ugristarum. Debrecen, 27. VIII. 2. IX. 1990. Debrecen, 1990. P. 326–330.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Гриппа Сергей Павлович**
доцент каф. наук о Земле и геотехнологий
Института лесных, горных
и строительных наук, к.г.н.
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 29, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: sgrippa@rkmail.ru

**Потахин Сергей Борисович**
профессор каф. наук о Земле и геотехнологий
Института лесных, горных
и строительных наук, д.г.н.
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 29, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: spotakhin@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

**Grippa, Sergey**
Institute of Forestry, Mining and Construction,
Petrozavodsk State University
29, Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: sgrippa@rkmail.ru

**Potakhin, Sergey**
Institute of Forestry, Mining and Construction,
Petrozavodsk State University
29, Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: spotakhin@yandex.ru

# ГИДРОХИМИЯ
# HYDROCHEMISTRY












УДК 502.51:504.5(470.22)

# ТЕХНОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ

**Н. Е. Галахина**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,*
*ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

**Аннотация.** Представленный в работе анализ многолетних гидрохимических материалов показал, что в результате функционирования Костомукшского ГОКа произошли существенные изменения в химическом составе воды хвостохранилища и системы р. Кенти по сравнению с природным состоянием. Существенно изменились величина минерализации, содержание калия, сульфатов, нитратов, лития и никеля. Техногенное влияние закономерно уменьшается к устью р. Кенти за счет боковой приточности и мало проявляется в оз. Ср. Куйто. Оценка загрязненности этих водных объектов на основе регионального индекса загрязненности воды показала ее увеличение в многолетнем плане.

**Ключевые слова:** поверхностные воды; техногенные воды; загрязнение; система р. Кенти.

## TECHNOGENIC IMPACT ON WATER BODIES IN NORTHERN KARELIA

**N. E. Galakhina**

*Northern Water Problems Institute,*
*Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

**Summary.** The analysis of long-term hydrochemical data showed significant changes have happened in the chemical composition of the tailings pond water and the Kenti River system in comparison with the natural state as a result of operations of the Kostomuksha mining and processing plant. The content of total dissolved solids, potassium, sulfates, nitrates, lithium, and nickel have changed notably. The technogenic impact decreases in a regular manner towards the mouth of the Kenti River due to the lateral inflow, and becomes inconspicuous in Lake Srednee Kuito. The assessment of the pollution of these water bodies based on the regional water pollution index revealed a long-term increase.

**Keywords:** surface water; technogenic waters; pollution; Kenti lake-river system.

**Тема лекции.** «Техногенное влияние на водные объекты Северной Карелии».

**Цель.** Получение новых знаний об изменении гидрологического и гидрохимического режима водных объектов, испытывающих антропогенное влияние в результате деятельности горнодобывающего предприятия.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Характеристика объекта исследования.
2. Источники антропогенного влияния.
3. Изменение химического состава воды хвостохранилища в многолетнем плане.
4. Изменение химического состава воды системы р. Кенти в многолетнем плане.
5. Характеристика загрязненности водоемов системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто.

Заключение.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** Подготовлена презентация «Техногенное влияние на водные объекты Северной Карелии». В презентации представлена история развития Костомукшского горно-обогатительного комбината, дана характеристика объекта

исследования, описаны источники антропогенного влияния, показана многолетняя динамика химического состава техногенных вод комбината и их приемников, а также приведена оценка загрязненности водных объектов, подверженных антропогенному влиянию.

## Изложение материала

**Введение.** Республика Карелия имеет хорошо развитую гидрографическую сеть, которую составляют более 60 тыс. озер и около 27 тыс. рек, примерно 20 % ее территории покрыто водными объектами. Химический состав поверхностных вод Карелии формируется в условиях труднорастворимых коренных пород Балтийского кристаллического щита, хорошо промытых четвертичных отложений и высокой заболоченности территории. Природное качество вод изменяется в результате сброса сточных вод, сельскохозяйственного использования, мелиорации земель и их загрязнения за счет атмосферных выпадений при трансграничных переносах. Из всех водных объектов Карелии наибольшую антропогенную нагрузку в настоящее время испытывают Онежское и Ладожское озера, водоемы района г. Костомукши [Лозовик и др., 2017].

Работа посвящена анализу изменения химического состава воды системы р. Кенти (район г. Костомукши), подверженной техногенному влиянию Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК) (АО «Карельский окатыш»). Предприятие введено в строй в 1982 г., и его деятельность связана с переработкой железной руды и производством железных окатышей объемом более 10 млн т/год (в 2020 г. – 10,8 млн т/год). Костомукшское месторождение железистых кварцитов было открыто в 1946 г. Магнитную аномалию выявили необычным способом – с помощью самолетов, на борту которых был установлен аэромагнитометр – уникальный по тем временам прибор. К 1970-м гг. были изучены Костомукшское, Корпангское и Южно-Корпангское месторождения, тогда же было принято решение построить новое горнодобывающее предприятие. В 1977 г. началось строительство комбината при участии финских строителей. Параллельно возводили город. В настоящее время в эксплуатации находятся 5 карьеров: Центральный, Южный, Северный-2 и Северный-3, относящиеся к Костомукшскому месторождению, и Западный корпангский карьер, освоение которого началось в 2007 г. Общий объем добываемой руды в среднем составляет около 30,6 млн т/год (по данным 2011–2012 гг.), при этом наибольшая часть руды добывается на Центральном (41 %) и Западном (38 %) карьерах.

Исследование изменения состояния водных объектов района г. Костомукши выполнено с использованием многолетних гидрохимических данных (1970–2015 гг. и 2019 г.), полученных в результате комплексных исследований водоемов района г. Костомукши. Наблюдения за состоянием оз. Костомукшского, а впоследствии хвостохранилища, а также водоемов системы р. Кенти ведутся с 1970-х гг. и по настоящее время [Харкевич и др., 1980; Харкевич, Митина, 1984; Феоктистов, Ипатова, 1985; Феоктистов, Морозов, 1985; Феоктистов и др., 1992; Морозов, 1998; Поверхностные воды…, 2001; Лозовик, Калмыков, 2007; Лозовик и др., 2007, 2010; Кулакова, Лозовик, 2012; Лозовик, Галахина, 2017]. Весь этот временной промежуток можно разделить на три периода:

1. 1970–1978 гг. – до эксплуатации железорудного месторождения, когда водоемы находились в естественном состоянии;

2. 1984–1993 гг. – период выхода комбината на проектные показатели, эксплуатация хвостохранилища в бессбросовом режиме;

3. 1994–2015 гг. – период регулируемых попусков воды из хвостохранилища в систему р. Кенти.

Химический анализ воды был выполнен в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, которая до 2017 г. имела аккредитацию в системе аккредитации аналитических лабораторий России. Достоверность химических анализов проверялась внутренним и внешним контролем. Последний осуществлялся в рамках международного проекта ICP-Waters [Intercomparison..., 2015] и внутрироссийского проекта «Межлабораторное сличение результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах» (2015), проведенного лабораторией в 2015 г.

**1. Характеристика объекта исследования.** Река Кенти (рис. 1) протекает через ряд озер и впадает в оз. Ср. Куйто, ее протяженность составляет 75 км, а водосбор является частным водосбором р. Кеми [Влияние…, 1995]. Верхнее оз. Поппалиярви является высокопроточным, а нижние озера системы характеризуются более замедленным водообменом (табл. 1).

**Таблица 1.** Гидрологические показатели озер системы р. Кенти [Озера Карелии, 2013]

**Table 1.** Hydrological indexes of the Kenti lake-river system [Ozera Karelii, 2013]

| Озеро | hср, м | F, км$^2$ | W, млн м$^3$ | τ, год |
|---|---|---|---|---|
| Поппалиярви | 4,3 | 1,6 | 6,9 | 0,16 |
| Койвас | 4,1 | 21,4 | 87,7 | 0,61 |
| Кенто | 3,8 | 30,8 | 117 | 0,55 |




**Рис. 1.** Карта-схема системы р. Кенти

**Fig. 1.** Schematic map of the Kenti lake-river system

Верхний водоем системы, оз. Костомукшское, превращен в хвостохранилище Костомукшского ГОКа. Озеро используется для оборотного водоснабжения комбината, а также для захоронения отходов производства (хвостов). В 1982 г. был введен в эксплуатацию южный канал, отводящий сток с водосборной территории хвостохранилища в оз. Окуневое. В 1989 г. поэтапно вводится

в действие северо-западный канал, отводящий сток северных притоков хвостохранилища в оз. Поппалиярви. Это привело к уменьшению площади водосбора хвостохранилища. С 1994 г. осуществляются регулируемые попуски воды из хвостохранилища в систему р. Кенти, которые и оказывают на нее основное техногенное влияние. Объем попусков варьирует от 9 до 24 млн $м^3$/год в зависимости от водности года и в среднем составляет около 13,1 млн $м^3$/год. Попуски воды из хвостохранилища стали вынужденной мерой по причине подъема уровня воды в нем до критических отметок и появления угрозы затопления насосной станции комбината.

В природном состоянии общая площадь оз. Костомукшского составляла 5,44 $км^2$, его водной поверхности – 5,18 $км^2$. Средняя глубина – 3,2 м, максимальная – 10 м, объем водной массы – 17,6 млн $м^3$. За время эксплуатации хвостохранилища произошли существенные изменения в его гидрологическом режиме [Пальшин и др., 1994]. По данным 2013 г., площадь зеркала хвостохранилища без площади островов составляет 14,434 $км^2$, площадь дна 14,461 $км^2$. Длина береговой линии 26,04 км. Объем водной массы – 205,1 млн $м^3$ при средней глубине 14,2 м. Максимальная глубина 34,7 м зафиксирована в северной части западного плеса. Площадь водосбора хвостохранилища уменьшилась со 142 $км^2$ до 68,4 $км^2$. Период его условного водообмена в естественном состоянии составлял 0,23 года, а в настоящее время в соответствии со средними попусками воды из хвостохранилища – около 30 лет.

**2. Источники антропогенного влияния.** Костомукшский ГОК оказывает существенное техногенное влияние на окружающую среду. К источникам загрязнения воздушной и водной среды относятся выбросы в атмосферу, а также отвалы вскрышных пород и техногенные воды.

Газовые и пылевидные выбросы в атмосферу

Выброс загрязняющих веществ горно-обогатительных производств в атмосферу является мощным антропогенным фактором, оказывающим негативное влияние на водные и наземные экосистемы. Перемещаясь воздушными потоками на большие расстояния от места выброса, они частично выпадают на землю с атмосферными осадками. Среди загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу Республики Карелия от предприятий горнодобывающей промышленности, подавляющая доля (97 %) приходится на АО «Карельский окатыш». В выбросах комбината в атмосферу преобладает диоксид серы (75–77 %), образующийся в процессе обжига железной руды, за счет использования топлива – мазута и окисления сульфидов, входящих в состав руды, на втором месте находятся твердые вещества (14–18 %), затем следуют оксиды азота и углерода (3–5 %) и прочие вещества (< 1 %) [Государственный доклад..., 2007, 2008, 2009, 2010, 2011].

Для оценки аэротехногенного влияния Костомукшского ГОКа на окружающую среду были проведены исследования атмосферных осадков на окружающей комбинат территории радиусом до 60 км [Feoktistov, Lazareva, 1994; Поверхностные воды…, 2001]. По распределению пыли были выделены 3 зоны загрязнения: максимального выпадения пыли (0–6 км от комбината) – 7–9 $г/м^2$, зона умеренного загрязнения (7–25 км) – 1,0–1,4 $г/м^2$ и зона минимального воздействия (удаление более 25 км) – 0,1–0,7 $г/м^2$. Элементный анализ состава пыли показал превышение содержания железа над другими элементами, что подтверждает ее техногенное происхождение. Исследования атмосферных осадков в районе г. Костомукши показали, что вблизи комбината в осадках наблюдаются высокие концентрации кальция, калия, сульфатов техногенного происхождения, а также железа общего, алюминия, ванадия и никеля. Влияние Костомукшского ГОКа, по данным анализов снеговых вод, наиболее значительно проявляется в радиусе до 3 км и ограничивается радиусом 30–50 км [Feoktistov, Lazareva, 1994].

Наряду с газовыми выбросами для рассматриваемой территории имеют большое значение и пылевидные выбросы, образующиеся за счет буровзрывных работ, при транспортировке руды и вскрышных пород и намыве дамбы. Пылевое загрязнение обнаруживалось по изменению естественного содержания золы в талломах лишайников и их субстратов [Фадеева, 2001]. По результатам многолетних исследований химического состава лишайников выявлено, что очаг загрязнения, где осаждается основная масса пылевидных частиц, прослеживается до 15 км от ГОКа. Слабое загрязнение ими наблюдается на территории до 34 км от комбината.

## Отвалы вскрышных пород

Горнодобывающая деятельность связана с образованием большого количества вскрышных пород и «хвостов» производства, которые аккумулируются на земной поверхности. Средний объем образования вскрышных пород на Костомукшском ГОКе в 2007–2010 гг. составил 88,8 млн т/год [Государственный доклад..., 2007, 2008, 2009, 2010, 2011]. Считается, что отвалы вскрышных пород являются источником сильнейшего техногенного влияния, поскольку могут быть причиной образования дренажных вод с низкими величинами pH и высокими концентрациями металлов [Wong et al., 1998], поступающих в поверхностные водные объекты.

Минерализация в воде, фильтрующейся через отвалы, достигает 5900 мг/л, а содержание сульфатов – 3036 мг/л. Поступление последних связано с процессами окисления пирита ($FeS_2$) с образованием кислой среды [Kleinmann et al., 1981; Lowson, 1982; Оллиер, 1987], которая способствует усилению выщелачивания других компонентов из сопутствующих руде пород. В то же время контакт фильтрационных вод с отвалов на дневной поверхности с силикатными и вкраплениями карбонатных пород приводит к нейтрализации этих кислых вод и выпадению в осадок гидроксидов Al, Fe, Mn и др. Воды с отвалов относятся к сульфатно-магниевым, это связано с тем, что $CaSO_4$ – труднорастворимая соль, а $MgSO_4$ – хорошо растворимая. Поэтому поступление в воду ионов $Ca^{2+}$ ограничивается растворимостью $CaSO_4$.

В фильтрационной воде из отвалов концентрация $N_{орг}$ составляет 36,6 мгN/л, содержание $NO_3^-$ достигает 52,8 мгN/л, а в водоеме рядом с отвалом оно снижается до 34,2 мгN/л.

Кроме того, в кислых водах, фильтрующихся через отвалы (pH 4,7), отмечается высокое содержание Ni (3,9 мг/л), Li (137 мкг/л), Mn (24,4 мг/л) и Al (29,2 мг/л), тогда как уже в поверхностном источнике вблизи отвалов значение pH воды повышается до 6,9 и концентрация Al резко снижается до 18 мкг/л за счет гидролиза его солей.

## Техногенные воды

Источником загрязнения поверхностных вод в зоне действия Костомукшского ГОКа являются его техногенные воды [Лозовик и др., 2007], среди них выделяют четыре типа:

– рудничные воды, которые на Костомукшском месторождении закачиваются в хвостохранилище, а на Корпангском – по ручью Безымянному поступают в р. Корпангийоки, приток оз. Койвас, их общий объем составляет около 9 млн $м^3$/год;

– попуски воды из хвостохранилища в систему р. Кенти, объем которых зависит от водности года и в среднем составляет около 13 млн $м^3$/год;

– фильтрационные воды, поступающие из хвостохранилища и с отвалов вскрышных пород.

В определенной степени к техногенным можно отнести и воды отводных каналов (северо-западного и южного), поскольку в первый стекают воды с отвалов вскрышных пород, а второй принимает воды от всех источников загрязнения.

Техногенные воды отличаются очень высокой минерализацией ($\Sigma_и$) и аномальным соотношением главных ионов. Наибольшую $\Sigma_и$ имеют рудничные воды (в среднем 1500 мг/л) (рис. 2).

Минерализация воды хвостохранилища меньше, чем рудничной воды. Несмотря на то что она используется для оборотного водоснабжения, незначительное время контакта воды с породой в технологическом цикле (около 1 суток) не приводит к существенному обогащению воды солями. Кроме того, поступление вод с водосборной территории хвостохранилища и атмосферных осадков на его поверхность приводит к разбавлению его вод. Фильтрационная вода имеет почти в 2 раза большую $\Sigma_и$, чем вода хвостохранилища. Процесс фильтрации обеспечивает дополнительное поступление солей по сравнению с водой хвостохранилища.

Анализируя многолетнюю динамику $\Sigma_и$ в техногенных водах, следует отметить наличие тренда ее увеличения во всех техногенных водах, особенно начиная с 2004 г. (рис. 3).

Техногенные воды отличаются между собой по ионному составу. Для рудничных вод характерно преобладание ионов $Ca^{2+}$ и $SO_4^{2-}$, а в некоторых случаях и $NO_3^-$. Большей частью эти воды соответствуют гипсовым, что является типичной картиной для рудничных вод. Фильтрационная вода, как и рудничные, относится к сульфатно-кальциевому типу. Вода хвостохранилища по ионному составу является сульфатно-калиевой.

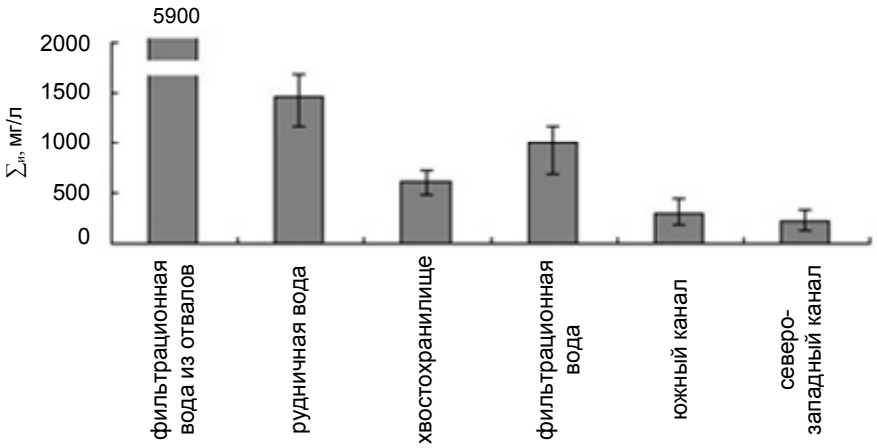



**Рис. 2.** Минерализация техногенных вод Костомукшского ГОКа и отводных каналов

**Fig. 2.** TDS in the Kostomuksha mine and mill process waters and diversion channels

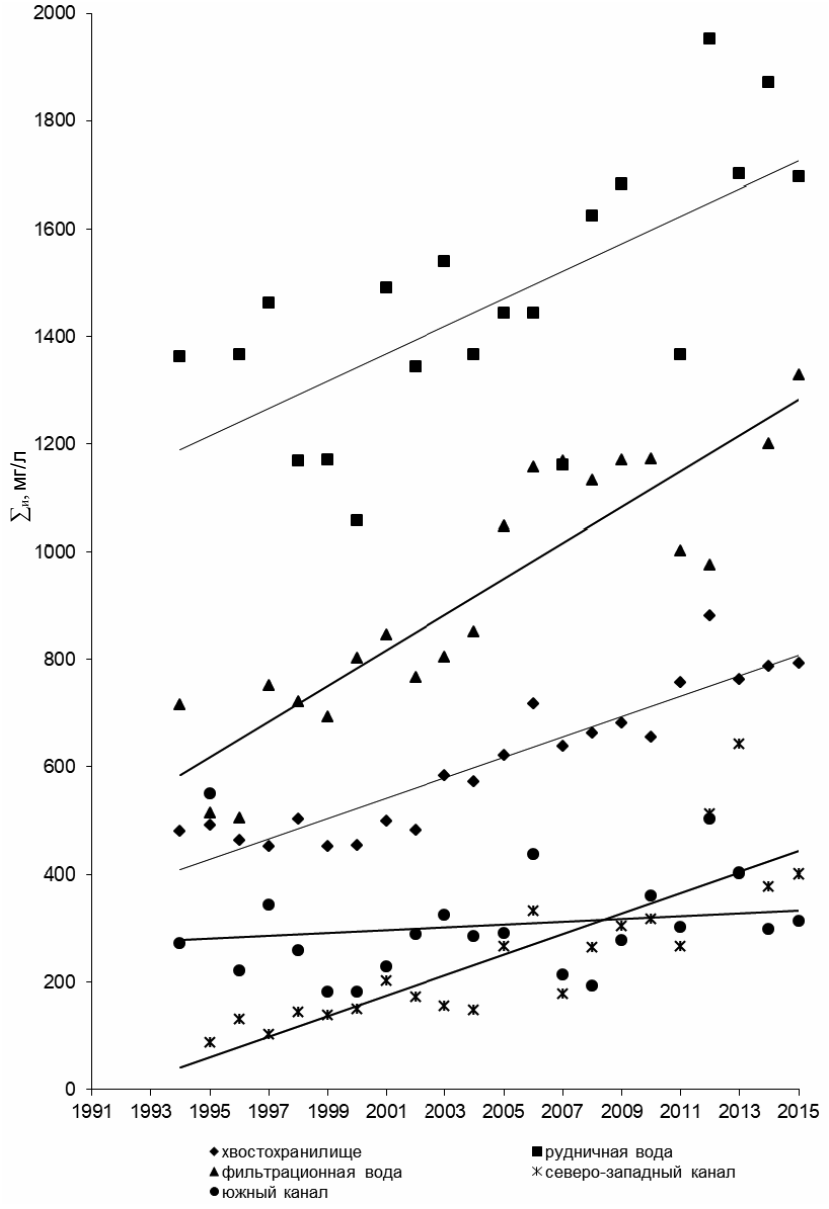



**Рис. 3.** Изменение $\sum_{и}$ в техногенных водах и отводных каналах в многолетнем плане

**Fig. 3.** Long-term TDS change in process waters and diversion channels

Ионный состав южного канала очень близок к составу воды хвостохранилища, что свидетельствует о ее поступлении в южный канал. Необычным ионным составом выделяются воды, фильтрующиеся из отвалов вскрышных пород. Они относятся к сульфатно-магниевому типу. Ионный состав воды северо-западного канала подтверждает поступление в него вод, фильтрующихся через отвалы. Воды южного канала генетически близки к водам хвостохранилища, рудничной и фильтрационной, как бы представляя их симбиоз.

Высокое содержание ионов $K^+$ в воде хвостохранилища обуславливает аномальные соотношения ионов щелочных металлов $Na^+$ и $K^+$ (среднемноголетнее 0,11) и щелочно-земельных к щелочным (среднемноголетнее 0,54), которые в природных водах не встречаются, что существенно сказывается на выживаемости некоторых гидробионтов [Дубровина и др., 1995].

Основным источником поступления калия в техногенные воды являются прежде всего биотиты, источник магния – биотиты и амфиболы, натрия и кальция – щелочные амфиболы, щелочные роговые обманки, а также постоянно присутствующий в железистых кварцитах минерал кальцит [Горьковец и др., 2002]. Источником неорганических соединений серы служит минерал пирит ($FeS_2$) [Горьковец и др., 2002], который окисляется с образованием гидроксида железа (нерастворимый минерал – лимонит) и серной кислоты [Kleinmann et al., 1981; Lowson, 1982; Оллиер, 1987].

Для техногенных вод Костомукшского ГОКа, за исключением фильтрационных вод из хвостохранилища, характерны высокие концентрации азотсодержащих веществ, среди которых преобладают нитраты. Их содержание в последние годы в воде хвостохранилища достигает 9,3 мгN/л, в рудничной воде Центрального карьера – 39,0 мгN/л (рис. 4). В этих водах отмечается и высокое содержание $N_{орг}$ (4,1–21,7 мг/л) за счет наличия 2,4,6-тринитротолуола и продуктов его распада. Концентрация 2,4,6–тринитротолуола достигает 4 мг/л (8ПДК) в рудничной воде и 1 мг/л (2ПДК) в воде хвостохранилища. В фильтрационных водах концентрация $NO_3^-$ составляет 0,06 мгN/л и находится на уровне регионального фона. По-видимому, при фильтрации воды через дамбу активно идет химическая денитрификация.

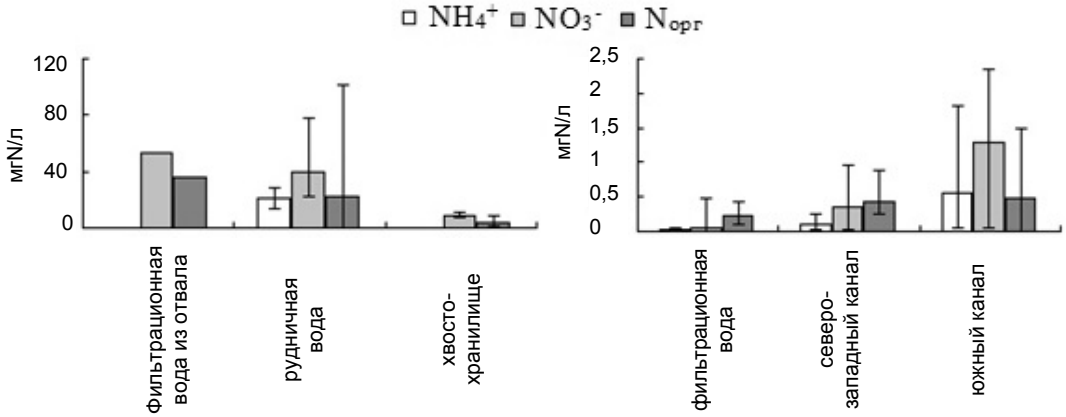



**Рис. 4.** Содержание азотсодержащих веществ в техногенных водах и отводных каналах

**Fig. 4.** Nitrogen concentrations in process waters and diversion channels

Высокие концентрации азотсодержащих веществ в рудничных водах обусловлены их поступлением при буровзрывных работах при добыче руды. В воду хвостохранилища они поступают с рудничными водами, а также в результате растворения азотсодержащих веществ, находящихся в виде остатков взрывчатых веществ на руде при ее технологической переработке. В водах южного и северо-западного отводных каналов содержание азотсодержащих веществ повышено ($N_{общ}$ – 1,6 и 3,7 мг/л соответственно), и связано это с влиянием техногенных источников, но оно намного меньше, чем в воде хвостохранилища и рудничных водах.

В ряде случаев техногенные воды характеризуются очень высоким содержанием микроэлементов, прежде всего Ni, Li, Mn и Al (рис. 5). При этом из всех вод в наибольшей степени выделяются рудничные воды (Ni – 56 мкг/л, Li – 95 мкг/л, Mn – 1,23 мг/л, Al – 4,93 мг/л) и воды, фильтрующиеся через отвалы вскрышных пород (Ni – 3,9 мг/л, Li – 137 мкг/л, Mn – 24,4 мг/л, Al – 29,2 мг/л).

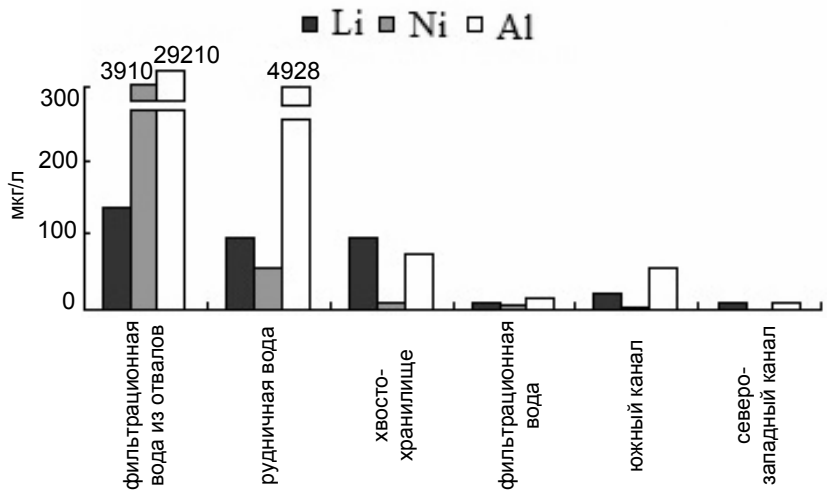



**Рис. 5.** Содержание микроэлементов в техногенных водах и отводных каналах

**Fig. 5.** Microelements content in process waters and diversion channels

В фильтрационной воде и водоотводных каналах содержание микроэлементов повышено по сравнению с природным фоном, но оно ниже ПДК этих элементов для рыбохозяйственных водоемов. Концентрация лития в фильтрационной воде в 2,5 раза ниже по сравнению с водой хвостохранилища. Повышенные концентрации лития наблюдаются в тех водах, где больше калия, это связано с их совместным выщелачиванием при переработке руды и при взаимодействии воды с породой в естественных условиях. В то же время карбонаты лития труднорастворимы в воде, а калия очень хорошо растворимы. По этой причине, по-видимому, наблюдается снижение концентраций лития в воде при ее фильтрации через дамбу плотины. На фоне других микроэлементов концентрации Fe не столь контрастны в техногенных водах и находятся на уровне концентраций, наблюдающихся в водах гумидной зоны. Степень гидролизуемости солей никеля, марганца меньше, чем солей железа, и это обуславливает их более высокие концентрации в техногенных водах по сравнению с Fe.

Техногенные воды отличаются весьма низким содержанием органического вещества (ОВ), минерального и общего фосфора, и зачастую их концентрации ниже, чем в водах природных объектов (табл. 2). Это связано с отсутствием ОВ в составе вскрышных пород и добываемой руды. Более высокие показатели содержания ОВ отмечены в воде отводных каналов, дренирующих водосборную территорию, что является весьма закономерным и типичным в формировании поверхностных вод.

**Таблица 2.** Органическое и взвешенное вещество, pH в техногенных водах и отводных каналах

**Table 2.** Organic matter, suspended solids, and pH in process waters and diversion channels

| Объект | ЦВ, град. | ПО, мгО/л | $БПК_5$, $мгО_2$/л | pH | Взв. в-во, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|
| Рудничная вода (Центральный карьер) | 7 | 3,9 | 2,1 | 7,9 | 1,0 |
| Фильтрационная вода | 21 | 3,4 | 1,3 | 7,8 | 8,2 |
| Хвостохранилище | 6 | $1,5^{*}/1,0^{**}$ | $1,2^{*}/2,0^{**}$ | 8,4 | 1,8 |
| Северо-западный канал | 53 | 13,7 | 1,2 | 6,9 | 12,3 |
| Южный канал | 47 | 9,8 | 1,8 | 7,6 | 4,2 |

*Примечание.* $^{*}$ Поверхностный горизонт, $^{**}$ придонный горизонт.

По величине $БПК_5$ выделяются воды из карьеров, в которых более высокие его величины, чем в воде хвостохранилища и отводных каналов. Связано это с биохимическим и химическим окислением тринитротолуола и продуктов его деструкции. О наличии последних свидетельствуют высокие показатели содержания $N_{орг}$. Концентрация взвешенного вещества колеблется в пределах 1,0–12,3 мг/л. Реакция среды в техногенных водах является слабощелочной (pH 7,8–8,4), за исключением кислых фильтрационных вод из отвалов вскрышных пород.

Таким образом, особенностями техногенных вод являются их высокая минерализация и аномальное соотношение главных катионов, а также значительное количество азотсодержащих веществ, микроэлементов (Ni, Li, Mn) и Al (в воде, фильтрующейся через отвалы) [Кулакова, Лозовик, 2012; Лозовик, Галахина, 2017]. Для этих вод характерны низкие концентрации органического вещества и $P_{общ}$.

Многолетний мониторинг водных объектов района г. Костомукши показал существенное изменение состава их вод в результате техногенного влияния [Лозовик, Галахина, 2017; Лозовик и др., 2017].

**3. Изменение химического состава воды хвостохранилища в многолетнем плане.** Анализ гидрохимического режима оз. Костомукшского в естественном состоянии выполнен по данным наблюдений Отделом водных проблем Карельского филиала Академии наук СССР в 1970–1978 гг. Вода оз. Костомукшского до превращения его в хвостохранилище характеризовалась невысокой минерализацией, в пределах 17–30 мг/л. В 1970–1978 гг. самая высокая минерализация наблюдалась в зимний период, как правило, в придонных слоях воды, что обусловлено усилением подземного питания озера в это время года. По ионному составу вода относилась к гидрокарбонатному классу группе кальция.

Поскольку оз. Костомукшское было высокопроточным водоемом, это сказывалось на содержании органического вещества и его сезонной динамике. По величинам косвенных показателей содержания ОВ (цветность (ЦВ), перманганатная окисляемость (ПО)) вода оз. Костомукшского в естественном состоянии относилась к мезогумусному типу, а в отдельные годы – мезополигумусному. Цветность воды за период 1970–1978 гг. изменялась в пределах 50–80 град., ПО – 9–13 мгО/л (см. табл. 2). Содержание биохимически легкоокисляемых ОВ в воде озера было невысоким ($БПК_5$ – 0,3–1,3 мг$O_2$/л), за исключением 1976 и 1977 г. ($БПК_5$ – 2,0–2,6 мг$O_2$/л). Из отдельных органических веществ в воде оз. Костомукшского были определены нефтепродукты и летучие фенолы. Нефтепродукты были обнаружены в низких концентрациях, и их содержание в единичных пробах не превышало 0,04 мг/л. Летучие фенолы в воде оз. Костомукшского чаще отсутствовали.

Величина pH находилась в пределах 6,3–6,9 на протяжении всего периода наблюдений. Максимальная концентрация $CO_2$ наблюдалась зимой (9,7–15,1 мг/л) и в придонных слоях летом (3,0–9,6 мг/л). Насыщение воды кислородом было выше 80 %, но ко дну в отдельные годы оно снижалось до 30 %.

Содержание железа в воде оз. Костомукшского на протяжении рассматриваемого периода исследований изменялось в пределах 0,19–1,56 мг/л, кремния – 0,8–4,9 мг/л.

Вода оз. Костомукшского отличалась низким содержанием фосфора. Концентрации минерального фосфора колебались в пределах 2–6 мкг/л, а общего – 10–20 мкг/л. Азот был представлен преимущественно органической формой (0,48–0,72 мгN/л). На втором месте находился аммонийный азот, его среднее содержание по сезонам года изменялось в пределах 0,07–0,16 мгN/л. Концентрация нитратов варьировала от < 0,01 до 0,02 мгN/л. Нитритный азот найден в единичных пробах и не более 0,007 мгN/л.

Таким образом, в период 1970–1978 гг. в естественном состоянии оз. Костомукшское являлось мезогумусным водоемом, маломинерализованным, со слабокислой реакцией среды. В нем отмечались низкое содержание биогенных элементов, а также высокие концентрации железа, что является типичной картиной для поверхностных вод Карелии.

В химическом составе оз. Костомукшского, превращенного в хвостохранилище, с вводом в эксплуатацию Костомукшского ГОКа постепенно происходили существенные изменения. Формирование химического состава воды хвостохранилища происходит за счет поступления оборотной воды с производственного цикла, рудничных вод, а также поверхностного притока с водосборной территории, выпадения атмосферных осадков на водную поверхность и испарения.

Данные, полученные в период 1984–1993 гг. (табл. 3), позволили проследить изменение гидрохимического режима хвостохранилища на разных стадиях его наполнения [Феоктистов, Сало, 1990]. Уже в 1984 г. минерализация воды превысила фоновые значения почти в 10 раз и составила 247 мг/л, а в 1993 г. достигла 420 мг/л. Среди главных ионов в большей степени увеличилась доля калия, гидрокарбонатов и сульфатов.

**Таблица 3.** Некоторые показатели химического состава воды оз. Костомукшского (1970–1978) и хвостохранилища (1984–2015)

**Table 3.** Some characteristics of the water chemical composition of Lake Kostomukshskoe (1970–1978) and the tailings pond (1984–2015)

| Год исследования | $K^+$ | $SO_4^{2-}$ | $\Sigma_и$ | pH | $NH_4^+$ | $NO_3^-$ | Классификация по Алекину |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | мг/л | | | | мгN/л | | |
| 1970–1978 | 0,8 | 2,5* | 21,1 | 6,5 | 0,11 | 0,006 | $HCO_3^-$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ |
| 1984 | 59 | 31,2 | 247 | 8,0 | 0,06 | 0,24 | $HCO_3^-$, $K^+$ |
| 1987–1993 | 105 | 69,5 | 380 | 8,2 | 0,04 | 0,95 | $HCO_3^-$, $K^+$ |
| 1994–2015 | 158 | 228 | 609 | 8,0 | 0,3 | 7,5 | $HCO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $K^+$ (1994–1998)<br>$SO_4^{2-}$, $HCO_3^-$, $K^+$ (1998–2002)<br>$SO_4^{2-}$, $K^+$ (2003–2015) |

*Примечание.* * За содержание сульфатов взято среднерегиональное фоновое значение для водных объектов района г. Костомукши.

Высокое содержание ионов $K^+$ обуславливает аномальные соотношения ионов щелочных металлов ($[Na^+]/[K^+]$) и щелочно-земельных к щелочным ($[Ca^{2+}+Mg^{2+}]/[Na^++K^+]$), нехарактерные для природных вод, что существенно сказывается на выживаемости некоторых гидробионтов [Дубровина и др., 1995]. Так, если в естественном состоянии эти соотношения составляли $[Na^+]/[K^+]$ – 3,50 и $[Ca^{2+}+Mg^{2+}]/[Na^++K^+]$ – 2,78, то к 1993 г. их значения снизились до 0,17 и 0,50 соответственно. По ионному составу вода хвостохранилища по сравнению с естественным состоянием оз. Костомукшского превратилась в гидрокарбонатно-калиевую (см. табл. 3). Кроме того, наблюдались постоянное увеличение эквивалентной доли сульфатов и уменьшение гидрокарбонатов.

С превращением оз. Костомукшского в хвостохранилище в нем снизилось содержание органического вещества. Величины ПО и цветности в 1993 г. составили 3,2 мгО/л и 29 град. против 12,7 и 70 в 1978 г. соответственно. Связано это с тем, что в водоеме происходило увеличение доли техногенных вод с низким содержанием ОВ по сравнению с приточными водами с водосборной территории.

В период 1984–1993 гг. отмечен рост концентрации некоторых форм азота (табл. 4), а именно нитратов, за счет поступления их в хвостохранилище с рудничными водами.

**Таблица 4.** Средние концентрации форм азота в воде хвостохранилища

**Table 4.** Average concentrations of nitrogen forms in the tailings pond water

| Год исследования | $N_{орг}$ | $NH_4^+$ | $NO_2^-$ | $NO_3^-$ |
|---|---|---|---|---|
| | мгN/л | | | |
| 1984–1985 | 0,58 | 0,06 | 0,002 | 0,24 |
| 1987 | 0,72 | 0,00 | 0,001 | 0,21 |
| 1988 | 0,47 | 0,04 | 0,002 | 1,17 |
| 1989 | – | 0,08 | 0,002 | 1,72 |
| 1993 | 0,94 | 0,02 | 0 | 0,69 |

В период 1984–1993 гг. наблюдалось увеличение содержания такого микрокомпонента, как литий. Так, если его природные фоновые величины в водоемах района г. Костомукши < 2 мкг/л, то к 1993 г. содержание в хвостохранилище возросло до 5,9 мкг/л. Загрязнения тяжелыми металлами (Cu, Ni, Pb, Cd, Zn) в указанные выше годы не было обнаружено.

На начальном этапе эксплуатации хвостохранилища в воде резко увеличилось содержание железа и взвешенных веществ. Так, в 1984 г. концентрация последних достигала 112 мг/л, по мере наполнения хвостохранилища количество взвеси и железа уменьшалось и в 1993 г. не превышало 2 и 0,1 мг/л соответственно. Высокие концентрации железа и взвешенных веществ, а также $P_{общ}$ (в 1984–1985 гг. содержание достигало 220–380 мкг/л, причем подавляющая его часть находилась во взвешенном состоянии, а к 1993 г. оно снизилось до 20 мкг/л) в первые годы эксплуатации хвостохранилища связаны со взмучиванием естественных донных отложений, накопленных в оз. Костомукшском. В дальнейшем при аккумулировании пульпы на дне водоема, которая характеризуется большой плотностью, этот эффект был утрачен.

Таким образом, уже на начальном этапе эксплуатации хвостохранилища произошли изменения в его химическом составе. К 1993 г. вода в нем стала высокоминерализованной со слабощелочной реакцией среды, гидрокарбонатно-калиевого типа с низким содержанием органического вещества и железа.

С 1994 г. начались регулируемые попуски воды хвостохранилища в систему р. Кенти, и, согласно полученным гидрохимическим данным, в этот период происходит дальнейшее изменение химического состава его воды. Продолжается рост минерализации и главных ионов, за исключением гидрокарбонатов (рис. 6). В период с 1994 г. по 2019 г. в воде хвостохранилища величина $\Sigma_и$ увеличилась почти в 2 раза (с 400 до 900 мг/л), содержание $SO_4^{2-}$ – в 6 раз (с 60 до 470 мг/л).

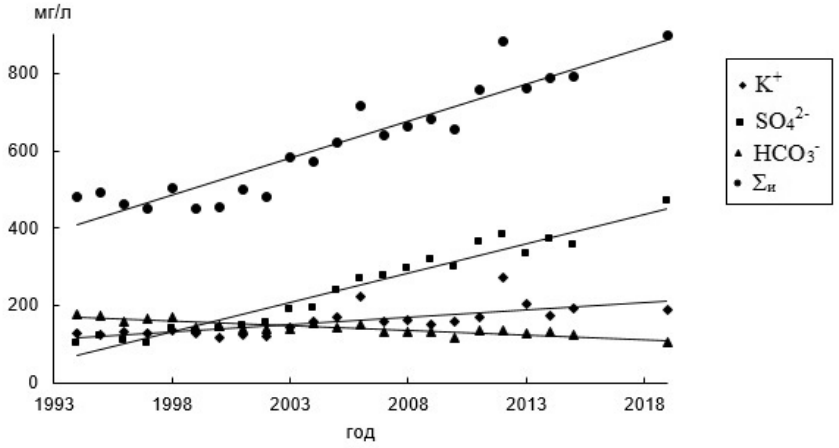



**Рис. 6.** Многолетняя динамика минерализации, содержания $K^+$, $SO_4^{2-}$ и $HCO_3^-$ в воде хвостохранилища

**Fig. 6.** Long-term dynamics of TDS, $K^+$, $SO_4^{2-}$, and $HCO_3^-$ content in the tailings pond water

Лабораторными опытами было установлено, что увеличение выщелачивания сульфатов связано с окислением сульфидов, содержащихся в виде примесей в рудах Костомукшского и Корпангского месторождений [Кулакова, Лозовик, 2011]. Известно, что окисление пирита железа сопровождается образованием серной кислоты, в присутствии которой будут разлагаться гидрокарбонаты. По этой причине и отмечается тренд уменьшения их содержания за последние десятилетия.

В связи с постоянным увеличением содержания калия и сульфатов в воде хвостохранилища произошли изменения в ионном составе, она стала сульфатно-калиевого типа. Соотношение ионов щелочных металлов и щелочно-земельных к щелочным остается аномальным, как и на начальном этапе эксплуатации хвостохранилища, и сохраняется на одном уровне, в среднем составляет 0,19 и 0,63 соответственно.

В период 1994–2002 гг. наблюдалось увеличение содержания нитратов, а в последующие годы оно стабилизировалось, и с 2004 г. наметилась тенденция его снижения (рис. 7). Содержание аммония в воде хвостохранилища низкое (средняя концентрация за весь рассматриваемый период 0,06 мгN/л) несмотря на высокое его поступление с рудничными водами. По-видимому, происходит частичное улетучивание $NH_3$ из воды хвостохранилища, имеющей слабощелочную реакцию среды, а также его превращение в другие формы азота в результате протекания микробиологических процессов.

Содержание железа и кремния в рассматриваемый период было достаточно стабильным. Средняя концентрация $Fe_{общ}$ невысокая (0,25 мг/л), и она ниже, чем среднерегиональный фон, характерный для поверхностных вод Карелии (0,43 мг/л) [Лозовик, 2006]. Содержание кремния находится на уровне региональных природных величин и составляет в среднем 2,4 мг/л.

Что касается органического вещества, то его содержание к настоящему времени существенно снизилось по сравнению с предыдущим периодом, судя по величине его косвенных показателей. Так, перманганатная окисляемость и цветность в 2015 г. составили 0,9 мгО/л и 4 град. против 3,2 и 29 в 1993 г. соответственно.

Содержание взвешенного вещества достаточно стабильное в зимний период и в среднем составляет 1,2 мг/л (см. рис. 4). В летний период 2007–2010 гг. наблюдалось повышение концентрации взвешенных веществ в среднем до 4,6 мг/л за счет гидродинамических процессов.

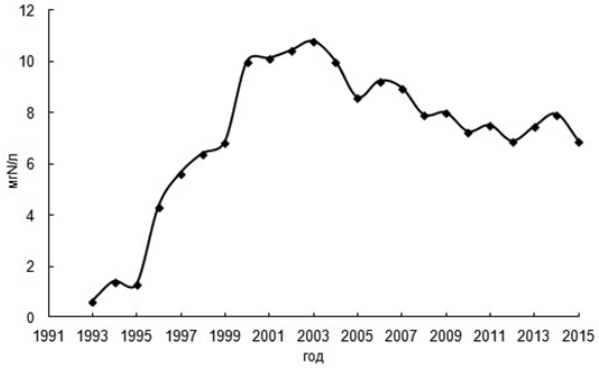



**Рис. 7.** Многолетнее изменение содержания $NO_3^-$ в воде хвостохранилища

**Fig. 7.** Long-term dynamic of nitrate content in the tailings pond water

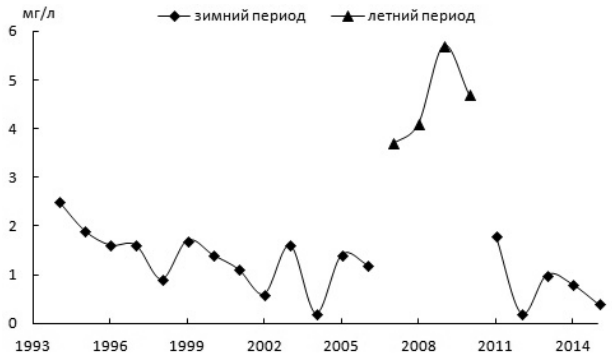



**Рис. 8.** Изменение содержания взвешенного вещества в поверхностном горизонте воды хвостохранилища в зимний и летний периоды

**Fig. 8.** Changes in suspended solids content in the surface layer of the tailings pond water in winter and summer

По сравнению с бессбросовым периодом эксплуатации хвостохранилища в 1995–2014 гг. отмечается тренд роста содержания лития (от 55 в 1995 г. до 110 мкг/л в 2014 г.) и в меньшей степени никеля – в пределах 5–21 мкг/л (рис. 9). Содержание других микроэлементов (Cr, Cu) находится на уровне региональных фоновых величин.

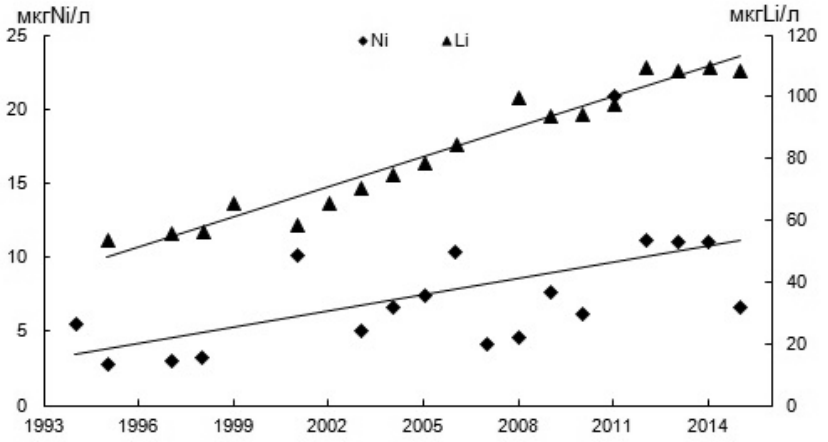



**Рис. 9.** Содержание лития и никеля в воде хвостохранилища (1994–2015)

**Fig. 9.** Lithium and nickel content in the tailings pond water (1994–2015)

Таким образом, в последнее десятилетие в воде хвостохранилища отмечается стабилизация ряда химических показателей (содержание нитратов, железа, взвешенных веществ и никеля), но продолжает увеличиваться концентрация калия, сульфатов и лития, а также наблюдаются рост минерализации воды и уменьшение ее щелочности. Такая тенденция связана с многократным использованием воды хвостохранилища для водоснабжения комбината.

**4. Изменение химического состава воды системы р. Кенти в многолетнем плане.** Анализ многолетних данных показал, что с вводом в эксплуатацию Костомукшского ГОКа произошли существенные изменения и в химическом составе воды озер системы р. Кенти (табл. 5, 6). В период бессбросового режима эксплуатации хвостохранилища основное техногенное влияние приходилось на оз. Окуневое в результате поступления фильтрационных вод. Это отразилось в основном на повышении содержания минеральных компонентов, и в первую очередь ионов калия. К 1993 г. $\Sigma_и$ в воде оз. Окуневого достигла 360 мг/л. При этом снизилось содержание ОВ и возросло значение pH (7,4). В озерах Поппалиярви и Койвас также произошло увеличение минерализации, но в меньшей степени, чем в оз. Окуневом. Водные объекты, расположенные ниже оз. Койвас, находились в состоянии близком к естественному.

**Таблица 5.** Некоторые показатели химического состава воды системы р. Кенти в естественном состоянии (1977–1978) и на этапе бессбросового режима эксплуатации хвостохранилища (1993)

**Table 5.** Some water chemical composition characteristics of the Kenti lake-river system in natural state (1977–1978) and in the period of the tailings pond operation before releases from it (1993)

| Озеро | 1977–1978 гг. | | | | | 1993 г. | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K^+$+$Na^+$ | $SO_4^{2-}$ | $\Sigma_и$ | $NO_3^-$, мгN/л | pH | $K^+$ | $SO_4^{2-}$ | $\Sigma_и$ | $NO_3^-$, мгN/л | pH |
| | мг/л | | | | | мг/л | | | | |
| Окуневое | 1,2 | 5,3 | 24,5 | < 0,01 | 6,6 | 49 | 153 | 361 | 0,32 | 7,4 |
| Поппалиярви | 2,0 | 7,0 | 23,7 | < 0,01 | 6,6 | 11 | 43 | 99 | 0,33 | 7,2 |
| Койвас | 2,4 | 5,7 | 20,3 | < 0,01 | 6,6 | 4 | 9 | 32 | 0,02 | 7,0 |
| Кенто | 2,1 | 5,5 | 18,3 | – | 6,6 | | | | | |
| Ср. Куйто | – | – | 21,3* | 0,1* | 6,0–6,98* | | | | | |

*Примечание.* * Данные 1982–1983 гг., – нет данных.

**Таблица 6.** Косвенные показатели содержания органического вещества в водоемах системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто в естественном состоянии (1977–1978) и на этапе бессбросового режима эксплуатации хвостохранилища (1993)

**Table 6.** Proxy indicators of organic matter content in the Kenti lake-river system and Lake Srednee Kuito in natural state (1977–1978) and in the period of the tailings pond operation before releases from it (1993)

| Озеро | 1977–1978 гг. | | | | 1993 г. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ПО | ХПК | $БПК_5$, $мгO_2$/л | ЦВ, град. | ПО | $БПК_5$, $мгO_2$/л | ЦВ, град. |
| | мгО/л | | | | мгО/л | | |
| Окуневое | 10,9 | 19,8 | 0,7 | 51 | 11,2 | 0,6 | 64 |
| Поппалиярви | 12,0 | 20,4 | 0,8 | 48 | 12,2 | 0,9 | 71 |
| Койвас | 10,0 | 17,3 | 0,9 | 39 | 10,1 | 0,8 | 48 |
| Кенто | 10,7 | 17,6 | 1,0 | 35 | | | |
| Ср. Куйто | 8,8* | 18,7* | 0,6* | 44* | | | |

*Примечание.* * Данные 1982–1983 гг.

Начиная с 1994 г. основное антропогенное воздействие на систему р. Кенти стали оказывать попуски воды из хвостохранилища. К источникам техногенного влияния также можно отнести воды северо-западного канала, принимающего сток с отвалов вскрышных пород, а в последнее время и рудничные воды с Корпангского месторождения, которые поступают по Безымянному ручью в р. Корпангийоки, притока оз. Койвас. Определенный «вклад» в загрязнение системы вносит и южный канал.

Техногенное воздействие ограничивается системой р. Кенти и благодаря значительному разбавлению вод в устье р. Кенти водами, поступающими из оз. В. Куйто, почти не затрагивает оз. Ср. Куйто, и ионный состав его воды не отличается от природного. Среднемноголетний расход воды в устье р. Кенти составляет 263,1 млн $м^3$/год, а с учетом стока из оз. В. Куйто – 352 млн $м^3$/год.

Поступление техногенных вод при попусках воды из хвостохранилища еще в большей степени отразилось на минерализации воды и ее ионном составе, чем это было до 1994 г. Так, $\Sigma_и$ в среднем, по данным 2001–2015 гг., изменяется в пределах от 485 в оз. Окуневом до 121 мг/л в оз. Кенто, и только в оз. Ср. Куйто ее значение больше соответствует фоновым (25 мг/л).

В многолетнем плане наблюдается тренд роста минерализации воды системы р. Кенти (рис. 10). При этом соотношение главных ионов мало меняется в связи с тем, что воды системы разбавляются приточными водами с низкими концентрациями веществ в них. Вода верхних озер (Окуневое, Поппалиярви) относится к сульфатно-калиевому типу, а нижних (Койвас, Кенто) – к сульфатно-калиево-кальциевому. Вода оз. Ср. Куйто вблизи устья р. Кенти соответствует гидрокарбонатному классу группы кальция, магния, т. е. природному типу вод. Поступление вод из оз. В. Куйто способствует разбавлению вод р. Кенти, что отражается на минерализации воды (существенное ее снижение) и на соотношении ионов.

Если сравнить ионный состав воды озер системы р. Кенти со средневзвешенным составом техногенных вод, то можно констатировать, что воды озер Койвас и Кенто почти в точности соответствуют средневзвешенному соотношению ионов в техногенных водах. Верхние озера отличаются от последних повышенной эквивалентной долей $K^+$. Озера Окуневое и Поппалиярви

находятся под прямым влиянием попусков воды из хвостохранилища в связи с их малыми размерами и небольшим притоком с водосбора. Нижние озера как более крупные, с учетом их замедленного водообмена по сравнению с верхними, обладают большей консервативностью к изменению ионного состава воды.

Высокие концентрации ионов калия в водоемах обуславливают аномальное соотношение щелочных металлов и щелочно-земельных к щелочным, которое к настоящему времени выровнялось по системе и в среднем (за последние 10 лет) составляет 0,29 и 1,12 соответственно.

Анализируя многолетнюю динамику содержания $K^+$ и $SO_4^{2-}$ в воде системы р. Кенти, следует отметить тренд их увеличения во всех озерах системы.

Низкое содержание ОВ наблюдается в верхних озерах – приемниках техногенных вод, в нижних – сказывается влияние боковых притоков и концентрации ОВ выше (табл. 7, 8). В природном состоянии картина была другой. В верхних озерах, как более проточных, концентрация ОВ была выше, чем в нижних. Насыщение воды кислородом изменяется в пределах 78–98 %, концентрация $CO_2$ – 0,1–4,3 мг/л, взвешенных веществ – 1,7–2,0 мг/л в период открытой воды, а зимой – 50–93 %, 5,0–15,3 и до 1,3 мг/л соответственно. Значения pH колеблются от 8,3 в оз. Окуневом до 7,4 в оз. Кенто в период открытой воды, а в зимний период их величины ниже – 7,6 и 6,5 соответственно. Полученные данные по содержанию $O_2$, $CO_2$ и взвеси свидетельствуют, что попуски воды из хвостохранилища несущественно сказываются на газовом режиме водоемов и содержании взвешенных веществ. В то же время попуски способствуют повышению pH воды, но его величины находятся в пределах биологического оптимума pH (6,5–8,5).

**Таблица 7.** Органическое и взвешенное вещество, pH, $O_2$ и $CO_2$ в водоемах системы р. Кенти (летний период 2010 г.)

**Table 7.** Organic matter, suspended solids, pH, $O_2$ and $CO_2$ concentrations in the Kenti lake-river system (summer 2010)

| Озеро | ЦВ, град. | ПО, мгО/л | $БПК_5$, $мгO_2$/л | $O_2$, % насыщ. (пов./дно) | $CO_2$, мг/л (пов./дно) | pH (пов./дно) | Взв. в-во, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Окуневое | 8 | 4,2 | 1,4 | 93/98 | 0/0,2 | 8,0/8,3 | 2,0 |
| Поппалиярви | 12 | 4,6 | 0,8 | 90/98 | 1,1/1,4 | 8,0/7,8 | 1,9 |
| Койвас | 20 | 6,0 | 0,4 | 84/84 | 3,4 | 7,1/7,5 | 1,7 |
| Кенто | 27 | 7,6 | 0,6 | 84/78 | 4,3 | 7,3/7,4 | 1,8 |
| Ср. Куйто | 30 | 7,7 | 0,6 | 84/84 | 3,5/4,0 | 6,9/6,8 | 1,9 |

В зимний период по всем водоемам системы отмечается стратификация химического состава воды, что связано с большим распространением техногенных вод как более тяжелых в придонных слоях, а речных вод с водосбора как более легких в поверхностных. Так, цветность воды в оз. Окуневом у дна была < 5 град., а на поверхности – 70, в оз. Кенто – 20 и 120 град. соответственно. Кроме того, поверхностные слои воды системы р. Кенти отличаются бóльшими величинами ПО (6,0–6,1 мгО/л), тогда как в придонных слоях эти значения снижаются и могут достигать 1,4 мгО/л, как это было в оз. Окуневом.

**Таблица 8.** Органическое и взвешенное вещество, pH, $O_2$ и $CO_2$ в водоемах системы р. Кенти (зимний период 2014 г.)

**Table 8.** Organic matter, suspended solids, pH, $O_2$ and $CO_2$ concentrations in the Kenti lake-river system (winter 2014)

| Озеро | ЦВ, град. Pt-Co шк. | $БПК_5$, $мгO_2$/л | ПО, мгО/л | $O_2$, % насыщ. | $CO_2$, мг/л | pH | Взв. в-во, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Окуневое (пов.) | 70 | 0,9 | 7,3 | 91 | 5,2 | 7,4 | 1,0 |
| Окуневое (5,0 м) | < 5 | 1,1 | 1,4 | 93 | 1,3 | 7,6 | 0,6 |
| Поппалиярви (пов.) | 44 | 0,7 | 8,1 | 73 | 9,1 | 7,3 | 0,6 |
| Поппалиярви (7,0 м) | 32 | 0,6 | 6,0 | 78 | 7,4 | 7,4 | 0,8 |
| Койвас (пов.) | 74 | 0,7 | 13,3 | 71 | 10,6 | 7,3 | 0,3 |
| Койвас (11,0 м) | 30 | 0,8 | 7,4 | 60 | 13,2 | 7,1 | 0,6 |
| Кенто (пов.) | 120 | 1,4 | 16,1 | 73 | 15,2 | 6,5 | 1,3 |
| Кенто (15,0 м) | 20 | 0,9 | 6,8 | 50 | 11,1 | 7,0 | 0,4 |
| Ср. Куйто (пов.) | 33 | 0,7 | 8,6 | 79 | 4,7 | 9,9 | 0,6 |
| Ср. Куйто (10,0 м) | 28 | 0,6 | 7,5 | 76 | 5,0 | 6,8 | 0,8 |

Вторым последствием техногенного влияния является азотное загрязнение системы р. Кенти. Анализ среднемноголетнего содержания нитратов позволил выявить закономерное уменьшение их концентраций от верхних озер системы к нижним (рис. 11). Среди азотсодержащих веществ $NO_3^-$ являются доминирующими, и только к нижнему течению р. Кенти и в оз. Ср. Куйто на первое место выходит $N_{орг}$, что является типичным для поверхностных вод Карелии. Следует отметить, что в самой системе содержание $NH_4^+$ и $NO_2^-$ достаточно низкое. Вода реки достаточно хорошо насыщена кислородом, и процессы нитрификации в ней идут как в природных водах, без каких-либо отклонений.

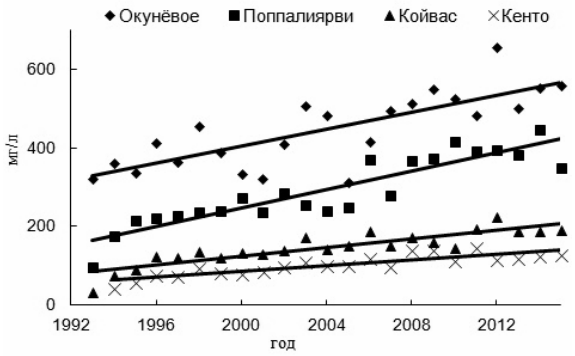



**Рис. 10.** Многолетняя динамика $\Sigma_и$ в водоемах системы р. Кенти

**Fig. 10.** Long-term TDS dynamics in the Kenti lake-river system

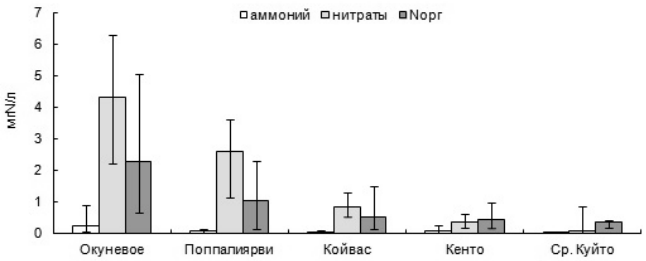



**Рис. 11.** Концентрация азотсодержащих соединений в водоемах системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто (2001–2015)

**Fig. 11.** Concentrations of nitrogen forms in the Kenti lake-river system

В многолетнем плане содержание нитратов в воде верхних озер (Окуневое, Поппалиярви) системы р. Кенти имеет тенденцию роста, тогда как в нижних (Койвас, Кенто) – относительно стабильно.

Микроэлементный состав, за исключением лития и никеля, полностью соответствует природным фоновым показателям. Концентрации Li и Ni закономерно уменьшаются от верхних озер к нижним за счет разбавления приточными водами, а концентрация алюминия – наоборот, растет (рис. 12). Последнее связано с его большим поступлением с приточными водами, имеющими слабокислую реакцию среды.

Анализируя многолетнюю динамику содержания Li и Ni в системе р. Кенти (рис. 13), следует отметить тренд увеличения концентрации лития по всем озерам, тогда как концентрация никеля изменяется в меньшей степени.

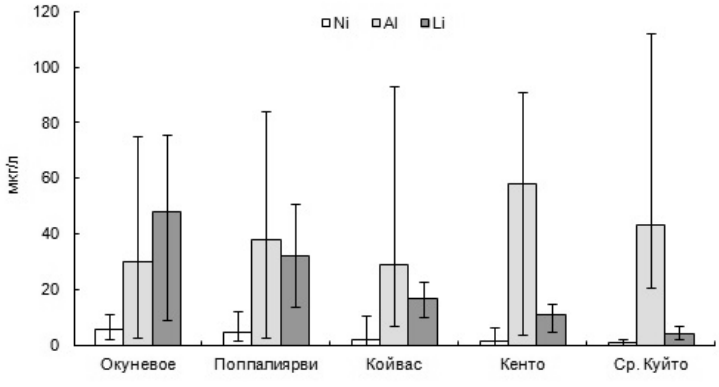



**Рис. 12.** Содержание микроэлементов в системе р. Кенти и оз. Ср. Куйто (по данным 2001–2015 гг.)

**Fig. 12.** Microelement content in the Kenti lake-river system (2001–2015 data)

Таким образом, попуски воды из хвостохранилища привели к еще бóльшим изменениям химического состава воды системы р. Кенти, и наиболее существенно это отразилось на величине минерализации, содержании калия, сульфатов, нитратов, лития и никеля. Техногенное влияние закономерно уменьшается к устью р. Кенти за счет боковой приточности и мало проявляется в оз. Ср. Куйто.

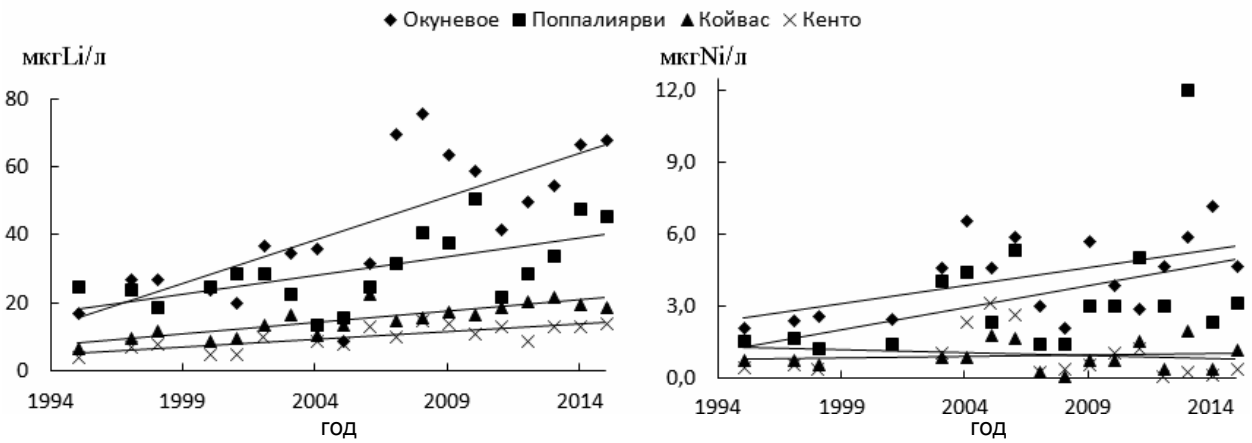



**Рис. 13.** Многолетняя динамика содержания Li и Ni в водоемах системы р. Кенти

**Fig. 13.** Long-term dynamics of lithium and nickel content in the Kenti lake-river system

**5. Характеристика загрязненности водоемов системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто.** На основании анализа многолетней изменчивости химического состава воды хвостохранилища и системы р. Кенти установлено, что показателями, в наибольшей степени отражающими техногенное влияние Костомукшского ГОКа, являются величина минерализации воды, соотношение главных катионов, содержание $K^+$, $SO_4^{2-}$, $NO_3^-$, Ni и Li.

С использованием приоритетных показателей загрязнения воды ($K^+$, $SO_4^{2-}$, $NO_3^-$, Li, Ni) проведена оценка загрязненности хвостохранилища, системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто путем расчета индекса загрязнения воды (ИЗВ) с использованием ПДК, согласно методическим рекомендациям [Временные методические…, 1986], и регионального индекса загрязненности воды (РИЗВ) на основе региональных ПДК (РПДК) [Лозовик, Галахина, 2019].

Расчет ИЗВ выполнен по формуле:

$$\text{ИЗВ} = 1/n \sum \frac{C_i}{ПДК_i},$$

где *Ci* – концентрация *i*-го компонента, *ПДКi* – предельно допустимая концентрация *i*-го компонента, *n* – количество показателей.

Наряду с ИЗВ был проведен расчет РИЗВ, который осуществлялся по аналогичной формуле, но с использованием РПДК, которая учитывает не только ПДК, но и региональный геохимический фон элементов [Лозовик, Платонов, 2005]. В качестве ПДК элементов использовались следующие значения: $K^+$ – 50 мг/л, $SO_4^{2-}$ – 100 мг/л, $NO_3^-$ – 9,1 мгN/л, Li – 80 мкг/л, Ni – 10 мкг/л [Нормативы…, 2016]. РПДК рассчитывалось как среднегеометрическое значение ПДК элемента и его фоновой концентрации. Значения РПДК для вышеуказанных веществ составляют: $K^+$ – 5 мг/л, $SO_4^{2-}$ – 16 мг/л, $NO_3^-$ – 0,3 мгN/л, Li – 6,3 мкг/л, Ni – 2,2 мкг/л.

Дополнительно к расчету ИЗВ выполнялись вычисления комбинаторного индекса загрязненности (КИЗВ) и удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), а также количество показателей, по которым наблюдается наибольшая степень загрязненности воды (КПЗ) в соответствии с [РД 52.24.643-2002]. Расчет комбинаторных индексов производился по содержанию $O_2$, $NH_4^+$, $NO_2^-$, $NO_3^-$, $K^+$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$, Ni, $Fe_{общ}$, Mn, Li, Al, Cu и величине $БПК_5$.

Индексы загрязненности были рассчитаны для различных годов: 1995 г. – когда начались попуски воды из хвостохранилища в систему р. Кенти, а также 2011–2015 гг. (КИЗВ, УКИЗВ), 2015 г. – ИЗВ и РИЗВ.

В соответствии со значениями ИЗВ (табл. 9), полученными для 1995 г., к категории «чистых» относятся хвостохранилище и все водоемы системы р. Кенти, за исключением оз. Кенто, которое, как и оз. Ср. Куйто, – «очень чистое». По региональным ПДК картина загрязненности выглядит иначе. Хвостохранилище является «очень грязным», оз. Окуневое, Поппалиярви – «грязное», оз. Койвас – «умеренно загрязненное», оз. Кенто, Ср. Куйто – «чистое». В 2015 г. загрязненность водоемов изменилась. Согласно полученным ИЗВ, хвостохранилище, озера Окуневое и Кенто

со временем стали «умеренно загрязненные», тогда как озера Поппалиярви, Койвас и Ср. Куйто сохранили свой статус. По РПДК хвостохранилище и оз. Окуневое стали «чрезвычайно грязными», оз. Поппалиярви – «очень грязным», Койвас, Кенто – «загрязненными», а оз. Ср. Куйто сохранило свою категорию «чистого» водоема.

**Таблица 9.** Загрязненность хвостохранилища, системы р. Кенти и оз. Ср. Куйто в различные годы по ИЗВ, РИЗВ, КИЗВ и УКИЗВ

**Table 9.** Different indexes of water contamination for the tailings pond, Kenti lake-river system and Lake Srednee Kuito across years

| Объект | ИЗВ | РИЗВ | КИЗВ | УКИЗВ | КПЗ |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1995 г. | | | | |
| Хвостохранилище | 0,9 | 9,6 | 36,8 | 2,8 | 2 (Fe, Al) |
| Оз. Окуневое | 0,5 | 4,4 | 25,8 | 2,0 | 2 (Fe, Mn) |
| Оз. Поппалиярви | 0,5 | 4,9 | 21,4 | 1,6 | 0 |
| Оз. Койвас | 0,2 | 1,7 | 16,4 | 1,3 | 0 |
| Оз. Кенто | 0,1 | 0,8 | 20,8 | 1,6 | 1 (Mn) |
| Оз. Ср. Куйто | 0,04 | 0,2 | 8,0 | 0,6 | 0 |
| | 2015 г. | | 2011–2015 гг. | | |
| Хвостохранилище | 1,7 | 17,1 | 67,7 | 4,8 | 3 (Fe, Mn, Cu) |
| Оз. Окуневое | 1,4 | 13,7 | 48,4 | 3,5 | 3 (Fe, Mn, Cu) |
| Оз. Поппалиярви | 0,9 | 9,1 | 46,2 | 3,3 | 3 (Fe, Mn, Cu) |
| Оз. Койвас | 0,4 | 4,0 | 29,6 | 2,1 | 2 (Mn, Cu) |
| Оз. Кенто | 1,3 | 2,4 | 36,8 | 2,6 | 3 (Fe, Mn, Cu) |
| Оз. Ср. Куйто | 0,1 | 0,4 | 28,8 | 2,1 | 2 (Mn, Cu) |

Полученные значения КИЗВ и УКИЗВ (см. табл. 9) также отражают закономерное изменение степени загрязнения хвостохранилища и водоемов системы р. Кенти в многолетнем плане. В 1995 г. хвостохранилище относилось к категории «загрязненное», водоемы системы р. Кенти – «слабо загрязненные», а оз. Ср. Куйто было «условно чистое», тогда как к 2015 г. хвостохранилище стало характеризоваться как «грязное», оз. Окуневое, Поппалиярви – «очень загрязненное», оз. Койвас, Кенто и даже Ср. Куйто – «загрязненное». Среди КПЗ в водоемах выявлены Fe, Mn и Cu, отражающие региональную специфику вод, а не их загрязнение.

**Заключение.** Анализ многолетних гидрохимических материалов показал, что в результате функционирования Костомукшского ГОКа произошли существенные изменения в химическом составе воды хвостохранилища и системы р. Кенти по сравнению с природным состоянием. В воде хвостохранилища увеличилось содержание большинства минеральных компонентов, особенно $K^+$, $SO_4^{2-}$, а также $NO_3^-$, наблюдаются низкие концентрации Fe, Mn, Al, $NH_4^+$, но повышенные Li и Ni. В то же время отмечается тенденция уменьшения концентрации $HCO_3^-$.

Основное антропогенное влияние на водные объекты системы р. Кенти оказывают попуски воды из хвостохранилища и сток из отводных каналов. Как следствие, в настоящее время по всей системе сформировался техногенноизмененный сульфатно-калиевый тип вод. В химическом составе воды всех объектов системы отмечено существенное увеличение $\Sigma_и$, содержания $K^+$, $SO_4^{2-}$, $NO_3^-$, Li и Ni по сравнению с их природным состоянием. Во всех объектах системы наблюдается ежегодный прирост концентрации этих компонентов. Связано это с тем, что вода из хвостохранилища используется для оборотного водоснабжения комбината и при технологической переработке руды происходит дальнейшее выщелачивание веществ из нее и сопутствующих пород.

По системе р. Кенти от верхних озер к нижним отмечается закономерное снижение всех показателей за счет разбавления, тогда как концентрация алюминия, наоборот, возрастает, и это связано с его поступлением с водосборной территории с приточными водами, имеющими слабокислую реакцию среды. В то же время по сравнению с природным состоянием уменьшилось содержание ОВ в связи с низким их количеством в техногенных водах. Следует отметить, что антропогенное влияние фактически не затрагивает оз. Ср. Куйто благодаря большому разбавляющему эффекту вод, поступающих в устье р. Кенти из оз. В. Куйто.

Оценка загрязненности хвостохранилища и водоемов системы р. Кенти, выполненная для различных периодов функционирования комбината, показала, что она возрастает в многолетнем плане. Результаты расчетов индексов загрязнения воды по региональным ПДК дали высокую степень загрязнения хвостохранилища и верхних озер системы (до уровня «чрезвычайно грязных») и более низкую – в нижних (в пределах «загрязненных»). Согласно расчетам КИЗВ и УКИЗВ по РД 52.24.643-2002 выявлено наибольшее загрязнение вод Fe, Mn и Cu, но оно не связано с антропогенным влиянием, а отражает региональную специфику вод.

## Задания

1. С чем связана деятельность Костомукшского ГОКа? Опишите его технологический цикл.
2. Перечислите основные источники антропогенного влияния комбината на окружающую среду.
3. Назовите отличительные особенности химического состава техногенных вод по сравнению с поверхностными водами региона.
4. Перечислите основные изменения в химическом составе воды приемников техногенных вод комбината.
5. Дайте прогноз дальнейшего изменения химического состава водных объектов, принимающих техногенные воды комбината.

## Литература


Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кенти / под ред. В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 100 с.

Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. М., 1986. 5 с.

*Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Калинкина Н. М. и др.* Источники поступления минеральных компонентов в техногенные воды Костомукшского ГОКа и их влияние на гидробионтов // Карелия и РФФИ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. С. 22–23.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2006 году. Петрозаводск, 2007. 308 с.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2007 году. Петрозаводск, 2008. 304 с.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2008 году. Петрозаводск, 2009. 288 с.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2009 году. Петрозаводск, 2010. 296 с.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2010 году. Петрозаводск, 2011. 292 с.

*Дубровина Л. В., Калинкина Н. М., Лозовик П. А.* Факторы токсичности для гидробионтов техногенных вод Костомукшского ГОКа // Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кенти. Петрозаводск, 1995. С. 15–25.

*Кулакова Н. Е., Лозовик П. А.* Экспериментальное выщелачивание руды Костомукшского и Корпангского железорудных месторождений // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 98–102.

*Кулакова Н. Е., Лозовик П. А.* Анализ влияния Костомукшского горно-обогатительного комбината на окружающую среду с учетом природно-техногенных факторов формирования и трансформации вод // Вода: химия и экология. 2012. № 2. С. 18–25.

*Лозовик П. А.* Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: автореф. дис. … докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.

*Лозовик П. А., Галахина Н. Е.* Изменение химического состава воды системы р. Кенти в результате техногенного влияния // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 21–35. doi: 10.17076/lim309.

*Лозовик П. А., Галахина Н. Е.* Оценка загрязненности водных объектов и нормирование допустимой антропогенной нагрузки на них // Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 133–137.

*Лозовик П. А., Галахина Н. Е., Кравченко И. Ю.* Современное состояние водных объектов Карелии в результате воздействия природных, климатических и антропогенных факторов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 24–39.

*Лозовик П. А., Калмыков М. В.* Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав воды озерно-речной системы р. Кенти // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 106–112.

*Лозовик П. А., Калмыков М. В., Дубровина Л. В.* Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав техногенных вод // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 100–106.

*Лозовик П. А., Калмыков М. В., Кулакова Н. Е.* Многолетняя динамика изменения режима системы р. Кенти под влиянием техногенных вод Костомукшского ГОКа: Материалы III Всероссийской конференции «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения». Ч. 1. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 203–208.

*Лозовик П. А., Кулакова Н. Е.* Методические подходы к оценке водных объектов в зоне действия предприятий горнодобывающей промышленности // Водные ресурсы. 2014. № 4. С. 429–438. doi: 10.7868/S0321059614040117.

*Лозовик П. А., Платонов А. В.* Определение региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология. 2005. № 6. С. 527–532.

Межлабораторное сличение результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 66 с.

*Морозов А. К.* Водоемы района Костомукши. Озерно-речная система Кенти. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск, 1998. С. 129–133.

Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Утв. Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552).

Озера Карелии. Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

*Оллиер К.* Выветривание. М.: Недра, 1987. 348 с.

*Пальшин Н. И., Сало Ю. А., Кухарев В. И.* Влияние Костомукшского ГОКа на экосистему р. Кенти. Гидрологические и гидрохимические аспекты / Исследование и охрана водных ресурсов бассейна Белого моря (в границах Карелии). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 140–161.

Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 165 с.

РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону, 2002. 50 с.

*Фадеева М. А.* Мониторинг состояния воздушной среды в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината (КГОКа) с использованием лишайников // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 209–224.

*Феоктистов В. М., Ипатова Р. Г.* О химическом составе воды верхнего участка системы р. Кенти // Исследование некоторых элементов экосистемы Белого моря и его бассейна: опер.-информ. материалы. Петрозаводск, 1985. С. 45–47.

*Феоктистов В. М., Морозов А. К.* О содержании микроэлементов в водотоках Костомукшского железорудного месторождения // Исследование некоторых элементов экосистемы Белого моря и его бассейна: опер.-информ. материалы. Петрозаводск, 1985. С. 48–50.

*Феоктистов В. М., Сало Ю. А.* Режим эксплуатации хвостохранилища Костомукшского ГОКа. Практические рекомендации. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1990. 42 с.

*Феоктистов В. М., Тимакова Т. М., Калугин А. И.* Влияние Костомукшского ГОКа на водную систему Кенти – Кенто // Водные ресурсы Карелии и экология. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. С. 63–78.

*Харкевич Н. С., Митина И. Ф.* Об изменениях в химическом составе воды озер бассейна р. Кенти в связи с антропогенным воздействием // Исследования Онежской губы и водоемов бассейна Белого моря: опер.-информ. материалы. Петрозаводск, 1984. С. 20–22.

*Харкевич Н. С., Фрейндлинг В. А., Басов М. И.* Современный гидрологический и гидрохимический режим вод бассейна р. Кенти: опер.-информ. материалы. Петрозаводск, 1980. С. 25–28.

*Feoktistov V. M., Lazareva I. P.* Snow contamination caused by an ore-dressing mill // Acidification of inland waters. Helsinki, 1994. P. 51–60.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, $NO_3$-N, Cl, $SO_4$, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn // Norwegian Institute for Water Research, Oslo. September 2015. 86 p.

*Kleinmann R. L. P., Crerar D. A., Pacelli R. R.* Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation // Mining Engineering. 1981. Vol. 33. P. 300–305.

*Lowson R.* Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen // Chem. Rev. 1982. Vol. 82, N 6. P. 461–497.

*Wong J. W. C., Ip C. M., Wong M. H.* Acing-forming capacity of lead-zinc mine tailings and its implication for mine rehabilitation // Envir. Geochem. Health. 1998. Vol. 20. P. 149–155.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Галахина Наталия Евгеньевна**
научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к.х.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: kulakovanata@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

**Galakhina, Natalia**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: kulakovanata@mail.ru

УДК 556.114 (470.21)

# ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИИ ОЗЕР КОЛЬСКОГО СЕВЕРА

**В. А. Даувальтер, С. С. Сандимиров**

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,*
*ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрены основные особенности химического состава воды озер, расположенных в различных ландшафтных зонах Мурманской области. Дано описание закономерностей распределения главных ионов, величины pH, органического вещества, биогенных элементов, микроэлементов, включая тяжелые металлы, в озерах различных размеров, а также гидрохимических особенностей озер в зоне влияния деятельности горно-металлургического комбината. Предложены показатели качества поверхностных вод Мурманской области с учетом региональных особенностей, которые сравнивались с критериями, принятыми в России и других арктических странах (Норвегии и Канаде).

**Ключевые слова:** гидрохимия; Арктическая зона Российской Федерации; загрязнение; качество поверхностных вод.

## PECULIARITIES OF LAKE HYDROCHEMISTRY IN THE KOLA NORTH

**V. A. Dauvalter, S. S. Sandimirov**

*Institute of North Industrial Ecology Problems,*
*Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*

**Summary.** The main features of the chemical composition of water in lakes located in various landscape zones of the Murmansk Region are considered. Distribution patterns of basic ions, pH values, organic matter, nutrients, trace elements, including heavy metals, in lakes of various sizes, as well as the hydrochemical characteristics of lakes in the mine-and-smelter impact zone are described. Surface water quality indicators accounting for regional characteristics are proposed for the Murmansk Region and compared against the criteria adopted in other Arctic countries (Norway and Canada).

**Keywords:** hydrochemistry; Arctic zone of the Russian Federation; pollution; surface water quality.

**Тема лекции.** «Особенности гидрохимии озер Кольского Севера».

**Цель.** Описать специфические особенности формирования химического состава воды озер Мурманской области.

**Задачи.** Образовательная задача: описание особенностей формирования химического состава воды озер. Личностная задача: формирование понимания значимости знаний о химическом составе поверхностных вод в практической жизни людей; осознание необходимости охраны озер от загрязнения. Познавательная задача: формирование интереса к исследовательской деятельности. Коммуникативная задача: выстраивание позитивных отношений в процессе учебной и познавательной деятельности. Предметная задача: усвоение понятий, знание гидрохимических показателей, умение правильно показывать крупные озера Мурманской области на географической карте, объяснять причинно-следственные связи, определять экологические угрозы и риски водным ресурсам. Метапредметная задача: оперирование гидрохимическими понятиями и терминами.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Материалы и методы.
2. Результаты и обсуждение.

2.1. Ионный состав и pH воды озер.
2.2. Органическое вещество и биогенные элементы в воде озер.
2.3. Микроэлементы в воде озер.
2.4. Гидрохимические особенности озер в зоне влияния деятельности горно-металлургического комбината.
2.5. Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области по содержанию тяжелых металлов в воде.

Заключение.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** Подготовлена презентация «Особенности формирования химического состава воды озер Кольского Севера». В презентации приведены характеристика озер Мурманской области, классификация озер по химическому составу, показаны примеры озер Мурманской области.

## Изложение материала

**Введение.** Европейский Север всегда ассоциировался с громадным количеством озер и рек с чистейшей водой, в которых обитают ценные виды рыб и беспозвоночных. Водоемы Мурманской области в целом включают два различных типа: крупные озерно-речные системы основных рек и системы многочисленных малых озер и рек. Данные водоемы, изначально обладающие высокими природными качествами, представляют собой важнейшие природные ресурсы Субарктики. Водные ресурсы Севера играют важнейшую роль в жизни коренных народов и экономики региона в целом. Однако глобальные экологические проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды и изменением климата, происходящие на нашей планете, отражаются на качестве воды северных водоемов, изменяя их гидрохимические и гидробиологические показатели. Бурный рост промышленности в XX столетии обусловил процессы глобального загрязнения окружающей среды.

Для арктических и субарктических регионов всё большую актуальность приобретает проблема оценки последствий долговременного аэротехногенного загрязнения водоемов, расположенных как в импактных зонах промышленных предприятий, так и в фоновых районах. В силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии в приполярные области переносится большая часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями более южных индустриально развитых регионов. Выбрасываемые в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению непосредственно в водоемах и на территории их водосбора.

В материалах предыдущей Международной молодежной школы-конференции [Лозовик, 2015] дается описание гидрохимии как науки, объектов ее изучения, задач, решаемых этой наукой, достижений и проблем в гидрохимии, существующих в настоящее время. Мы не будем останавливаться на этих вопросах, которые замечательно описал выдающийся российский гидрохимик Петр Александрович Лозовик, а уделим внимание в первую очередь отображению особенностей химического состава воды озер, расположенных в различных ландшафтных зонах Мурманской области и подверженных различной интенсивности антропогенному влиянию.

**1. Материалы и методы.** Всего в Мурманской области в пределах гидрографического района – 105 593 озера (рис. 1), 15 712 озер являются сточными с площадью водного зеркала более 0,01 км$^2$. В спектре исследований ИППЭС КНЦ РАН – озера Мурманского гидрографического района площадью более 0,04 км$^2$. Институтом исследовано более 800 озер Кольского Севера. Исходя из ландшафтно-географических признаков (высота над уровнем моря, залесенность, озерность, заболоченность) и уровня антропогенных нагрузок на территории Мурманской области было выделено 6 зон [Сандимиров, 1999]: северо-западная тундровая, северо-восточная тундровая, юго-восточная лесотундровая, западная лесная и две промышленные зоны вокруг комбинатов «Североникель» (центральная лесная) и «Печенганикель» (северо-западная лесотундровая). В рамках выделенных ландшафтно-географических зон представляются основные гидрохимические показатели озер.

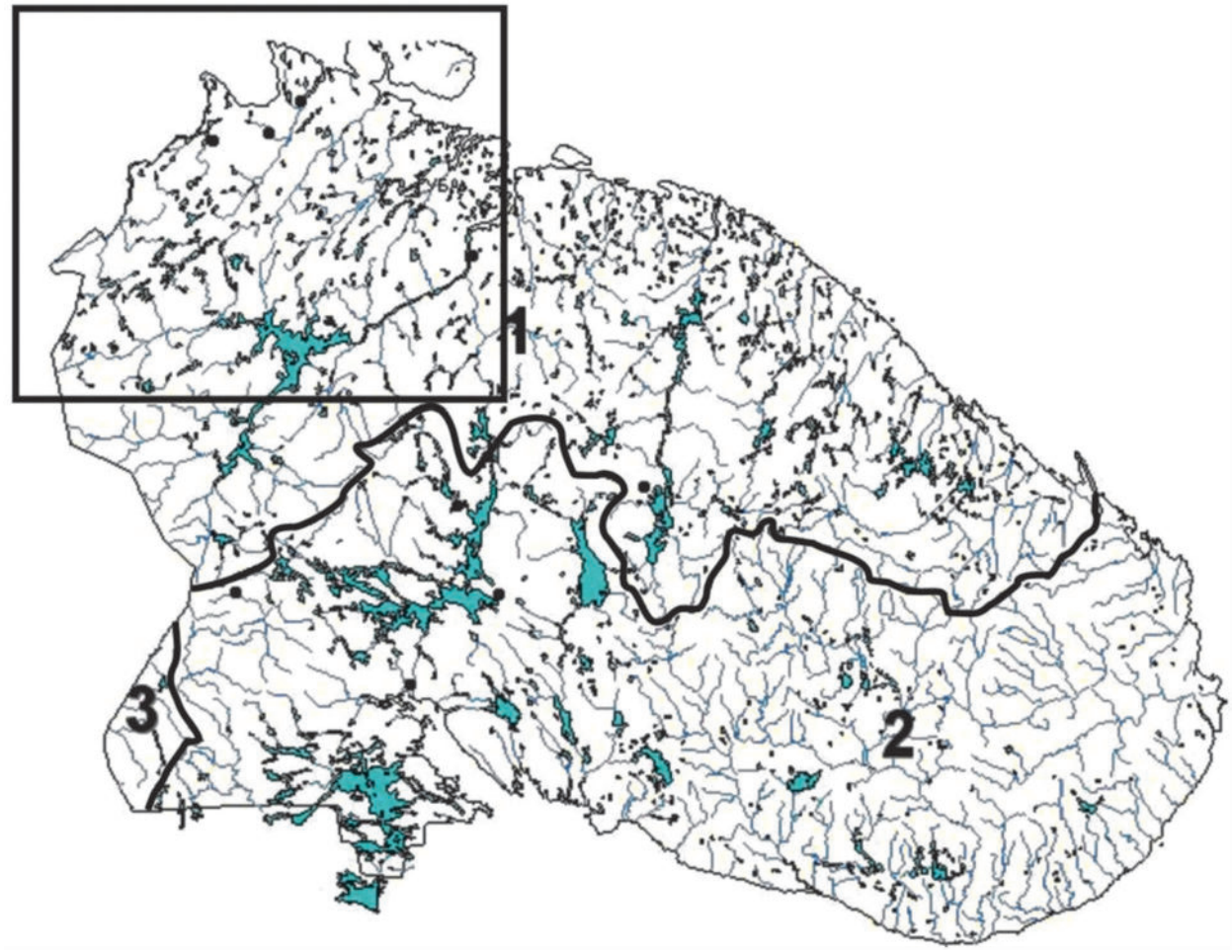



**Рис. 1.** Гидрографическая сеть Мурманской области:

бассейны: 1 – Баренцева моря, 2 – Белого моря, 3 – Балтийского моря. Прямоугольником обозначена территория влияния выбросов комбината «Печенганикель»

**Fig. 1.** Hydrographic map of the Murmansk Region:

drainage basins of seas: 1 – Barents, 2 – White, 3 – Baltic. The rectangle encloses the territory impacted by emissions from the Pechenganickel Company

Гидрохимические исследования проводились в озерах Мурманской области, как правило, в безледный период года во время экспедиционных работ, хотя они не прерываются и зимой. В зависимости от глубины озера пробы воды отбирались с поверхностного слоя, серединных слоев и придонного слоя 2-литровым пластиковым батометром. Пробы воды отбирались на трех горизонтах, при значительной глубине – с четырех. 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 ИППЭС КНЦ РАН (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 проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

Используемые методы анализа и пробоподготовки:

1) атомно-абсорбционная спектрофотомерия;
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 содержаний контролируемых загрязняющих веществ 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, pH, 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.

Подробнее методика проведения отбора и химического анализа воды описана ранее [Методы…, 2019].

## 2. Результаты и обсуждение

**2.1. Ионный состав и pH воды озер.** Ионы $Ca^{2+}$, $Na^{+}$, $Mg^{2+}$ и $K^{+}$ являются основными катионами химического состава поверхностных вод. $Ca^{2+}$и $Na^{+}$ характеризуются более высоким содержанием в земной коре, где находятся главным образом в виде силикатов и алюмосиликатов. Ионы $HCO_3^{-}$ определяют щелочность вод и их буферную способность. На большей части Мурманской области поверхностные воды соответствовали классу гидрокарбонатов. Ионы $SO_4^{2-}$ мигрируют с техногенными потоками и в настоящее время занимают превалирующее положение в анионном составе вод озер промышленных зон Мурманской области [Моисеенко и др., 1997].

Наиболее низкие содержания основных катионов в поверхностных водах Мурманской области приурочены к северо-восточной тундре (рис. 2), где преобладают коренные породы гранитогнейсовых формаций. Мозаично низкие значения катионов характерны также для озер горной тундры. Среди катионов поверхностных вод северо-западной и центральной промышленных зон преобладает $Ca^{2+}$ (средние концентрации 2,8 мг/л и 2,85 мг/л соответственно). В водах остальных регионов преобладает $Na^{+}$ (средние концентрации от 1,59 мг/л до 3,08 мг/л). В водах прибрежных районов также преобладает $Na^{+}$, что закономерно. В большинстве озер с содержанием катионов достаточно хорошо согласуется распределение $SO_4^{2-}$ и щелочности (см. рис. 2, 3).

Зависимость выражена линейными уравнениями:

$$\Sigma\ cat = 234{,}96 + 1{,}28\ SO_4\ (r = 0{,}84;\ p = 0{,}01),$$
$$\Sigma\ cat = 132{,}66 + 1{,}52\ Alk\ (r = 0{,}64;\ p = 0{,}01),$$

где Σ cat – сумма катионов (мкэкв/л); Alk – щелочность (мкэкв/л).

Можно отметить, что в пределах региона встречаются отдельные участки и достаточно большие районы, где озера имеют низкие содержания катионов и $HCO_3^{-}$, определяющих их высокую уязвимость к аэротехногенному загрязнению. Минимальное содержание катионов наблюдается в северо-западной и северо-восточной тундрах и в юго-восточной лесотундре, а $HCO_3^{-}$ – в северных тундровых зонах (см. рис. 2). Анализ гидрохимических параметров по классам размерности показывает, что наиболее мелкие озера (с площадью водного зеркала менее 0,1 км$^2$) характеризуются минимальными средними значениями щелочности – 59 мкэкв/л (табл. 1). Это указывает на увеличение уязвимости озер к аэротехногенному загрязнению по мере уменьшения их размера и повышение, соответственно, вклада атмосферных осадков в формирование химического состава вод. Анализ связи содержания основных ионов минерализации с высотой расположения всех исследованных озер над уровнем моря, с коэффициентом залесенности водосбора, а также с коэффициентом заболоченности местности не выявил достоверной зависимости [Сандимиров, 1999], что позволяет считать определяющими факторами формирования катионного состава вод в пределах Кольского региона геологические условия и уровень атмосферных выпадений. Распределение $Na^{+}$ и $Cl^{-}$ согласовано и определяется влиянием морских аэрозолей. Повышенным средним содержанием $Cl^{-}$ выделяются водосборы Баренцева моря, размерность озер на концентрацию хлора не влияет (см. табл. 1).

**Таблица 1.** Показатели содержания гидрохимических параметров в озерах Мурманской области в зависимости от площади водного зеркала (в числителе – пределы содержания, в знаменателе – медиана)

**Table 1.** Hydrochemical parameters of the Murmansk Region lakes depending on the water surface area (in the numerator – range, in the denominator – median)

| Параметры | Площадь водного зеркала озер, км$^2$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,04–0,1 | 0,1–1 | 1–10 | > 10 |
| pH | 4,15–8,16<br>6,27 | 4,28–7,63<br>6,6 | 4,59–8,47<br>6,3 | 6,58–7,42<br>6,93 |
| Цветность, град. | 0–650<br>71,5 | 0–700<br>86 | 2–540<br>58,5 | 5–131<br>29,5 |
| ХПК$_{Mn}$, мгО/л | 0,32–46,1<br>7,6 | 0–45<br>9,18 | 1,8–42,2<br>6,9 | 1,28–11,8<br>4,88 |
| РОВ, мгС/л | 1,79–36,77<br>7,35 | 1,55–35,93<br>8,5 | 2,92–33,79<br>6,82 | 1,55–10,56<br>5,06 |
| Электропроводность, мкS/см (20 ºС) | 8–150<br>26 | 10–209<br>31 | 12–282<br>30 | 25–116<br>33 |
| $Ca^{2+}$, мг/л | 0,16–15,7<br>1,33 | 0,19–16,2<br>2,07 | 0,64–9,4<br>2,44 | 1,63–10,5<br>2,53 |
| $Mg^{2+}$, мг/л | 0,09–2,63<br>0,68 | 0,09–5,35<br>0,85 | 0,26–5,38<br>0,84 | 0,38–3,47<br>0,87 |
| $Na^{+}$, мг/л | 0,42–18,8<br>1,95 | 0,38–27,2<br>2,21 | 0,82–39,7<br>2,27 | 1,26–5,89<br>2,02 |
| $K^{+}$, мг/л | 0,02–5,43<br>0,3 | 0,02–9,64<br>0,36 | 0,15–4,4<br>0,43 | 0,33–1,39<br>0,54 |
| $SO_4^{2-}$, мг/л | 0,35–35,1<br>1,95 | 0,27–45,4<br>2,23 | 0,42–20,8<br>2,62 | 0,84–31<br>2,99 |
| $Cl^{-}$, мг/л | 0,31–14,8<br>1,94 | 0,5–13,2<br>2,14 | 0.48–46.7<br>2.09 | 0,82–3,92<br>1,41 |
| Щелочность, мкэкв/л | 0–961<br>59 | 0–1035<br>120,5 | 0–973<br>143,5 | 73–637<br>214 |
| $PO_4^{3-}$, мкг/л | 0–46<br>0 | 0–113<br>1 | 0–16<br>0 | 0–2<br>0 |
| $P_{общ}$, мкг/л | 1–67<br>6 | 1–170<br>7 | 1–81<br>7 | 2–23<br>5 |
| $NH_4^{+}$, мкг/л | 1–470<br>8 | 0–1723<br>9 | 1–113<br>10,5 | 2–46<br>11 |
| $NO_3^{-}$, мкг/л | 0–2936<br>2 | 0–3426<br>2 | 0–1951<br>2 | 1–250<br>3 |
| $N_{общ}$, мкг/л | 35–3280<br>200 | 48–3428<br>204 | 33–1970<br>195,5 | 64–373<br>167 |
| Si, мг/л | 0,04–5,91<br>1,73 | 0,05–5,03<br>2,14 | 0,2–4,75<br>1,48 | 0,36–4,83<br>1,83 |
| Al, мкг/л | 3–650<br>55,5 | 4–840<br>56 | 3–730<br>34 | 9–92<br>18 |
| Fe, мкг/л | 3–1600<br>684 | 4–2500<br>100 | 8–1800<br>77 | 8–310<br>33 |
| Cu, мкг/л | 0,2–20<br>0,8 | 0,1–13,6<br>0,7 | 0,2–17,9<br>0,9 | 0,4–14,1<br>0,7 |
| Ni, мкг/л | 0,1–281<br>0,8 | 0,1–450<br>0,8 | 0,1–32<br>0,8 | 0,1–68<br>0,9 |
| Zn, мкг/л | 0,2–8,5<br>1,7 | 0,1–9,1<br>1,3 | 0,1–6<br>1 | 0,2–9,3<br>1 |
| Mn, мкг/л | 0,2–77<br>4,95 | 0,.3–69<br>4,7 | 0,5–56<br>3,8 | 1,2–41<br>3,4 |
| Sr, мкг/л | 1–200<br>14 | 2–200<br>18 | 7–185<br>20,5 | 14–190<br>26,5 |

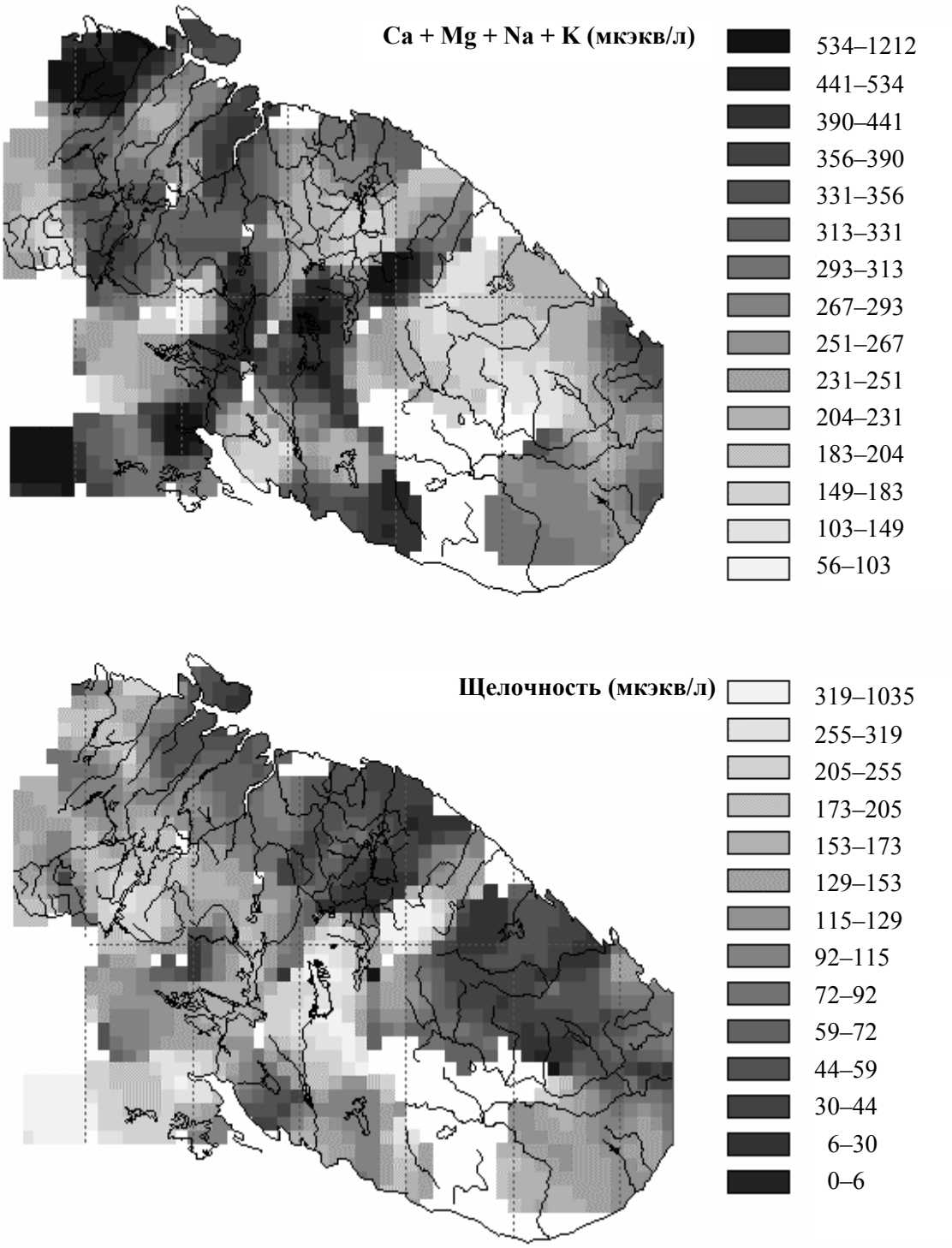



**Рис. 2.** Распределение содержания суммы катионов и щелочности в воде озер Мурманской области

**Fig. 2.** Distribution of the sum of cations and alkalinity in the water of lakes in the Murmansk Region

Графическое изображение распределения $SO_4^{2-}$ в поверхностных водах четко определяет два очага их распространения – вокруг металлургических комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» (рис. 3). Иногда наблюдаются повышенные концентрации в юго-восточном лесотундровом (до 44,2 мг/л) и западном лесном (до 33 мг/л) районах, что приобретает большую важность при анализе выпадения серы на водосборные бассейны, т. е. высокие концентрации $SO_4^{2-}$ наблюдаются

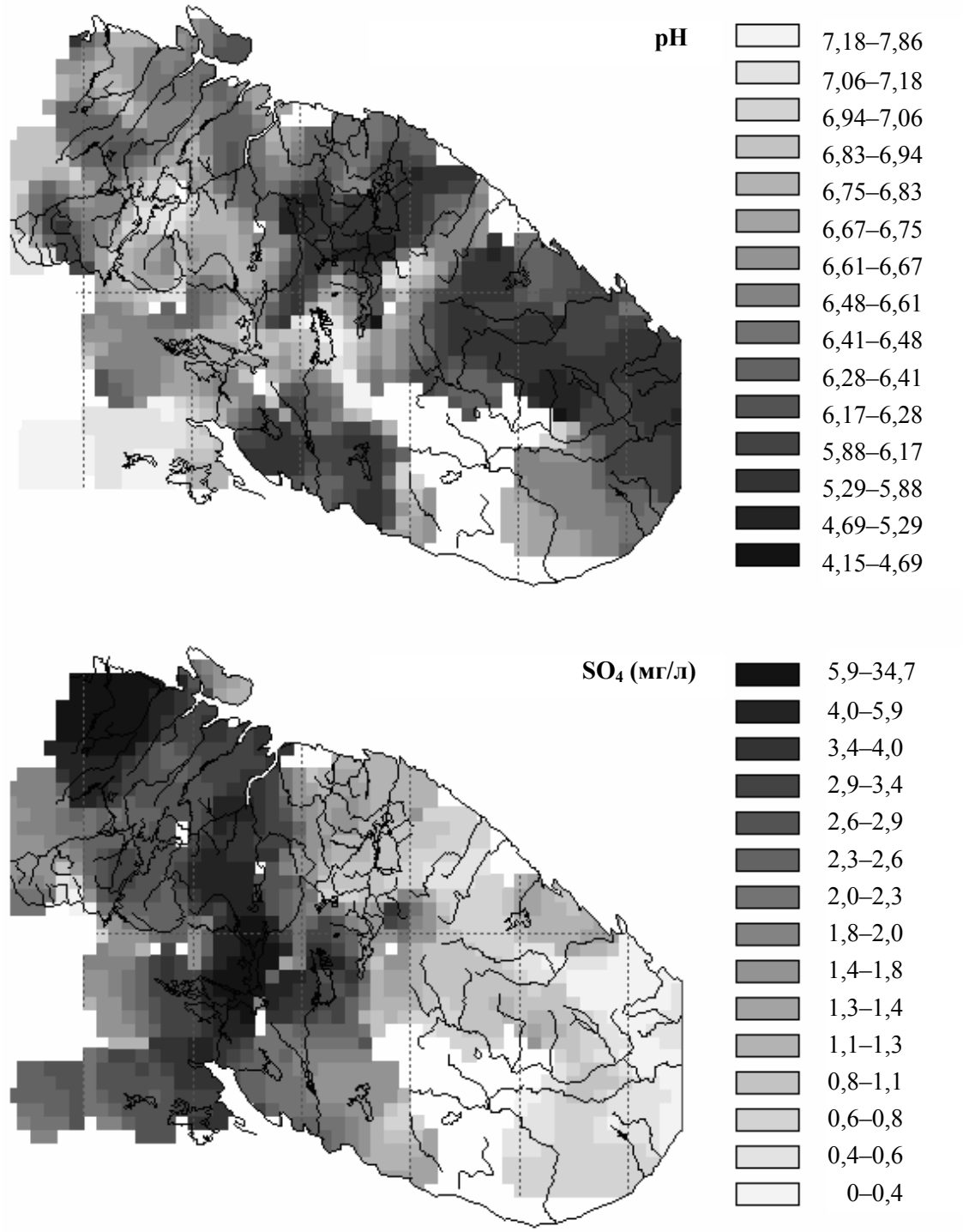



**Рис. 3.** Распределение показателя pH и содержания $SO_4^{2-}$ в воде озер Мурманской области

**Fig. 3.** Distribution of pH and $SO_4^{2-}$ content in the water of lakes in the Murmansk Region

во всех размерных классах озер на значительной территории региона. Факторный анализ гидрохимических данных исследованных озер показал, что только в северо-западной и северо-восточной тундрах $SO_4^{2-}$ не являются основополагающим фактором формирования химического состава вод [Сандимиров, 1999]. В остальных зонах они имеют наибольший факторный вклад, связанный с влиянием аэротехногенного загрязнения от промышленного производства.

На содержание $SO_4^{2-}$ в воде влияют удаленность и направленность дымового факела от плавильных цехов [Раткин, 1996]. В их распределении четко просматривается только градиентный

принцип. Выделяются три зоны по градиенту концентрации $SO_4^{2-}$: импактные, буферные и регионально-фоновые [Моисеенко, 1997]. Вокруг индустриальных центров содержание $SO_4^{2-}$ в озерах более 100 мкэкв/л, в ионном составе воды они занимают доминирующее положение. Согласно классификации вод [Алекин, 1970], современный химический состав вод в этих районах соответствует классу сульфатов, имеющих техногенную природу.

Наряду с увеличением концентрации $SO_4^{2-}$ происходит и нарастание общей минерализации вод за счет увеличения содержания главных катионов – $Ca^{2+}$, $Na^{+}$, $Mg^{2+}$ и $K^{+}$. Это связано как с пылевой эмиссией, так и с вымыванием катионов из основных и ультраосновных коренных пород, которые распространены в центральном и северо-западном промышленных районах.

Таким образом, в импактных индустриальных центрах высокий уровень выпадения $SO_4^{2-}$ сопровождается и высоким потоком катионов с водосборов, что обеспечивает высокую буферную емкость вод [Моисеенко и др., 1996]. Однако в ряде случаев низкое содержание катионов сопровождается низкой щелочностью (или ее отсутствием) и преобладанием $SO_4^{2-}$. Эти условия создаются на возвышенностях, где существуют обнажения кислых гранитогнейсовых пород. Поэтому в импактной зоне – до 10 % озер с очень низким содержанием основных катионов, где анионный состав контролируется только серной кислотой. В отдаленных от центра районах в анионном составе вод многих озер также преобладают $SO_4^{2-}$ техногенного происхождения. Здесь, за пределами пылевой эмиссии, в местах распространения гранитогнейсовых формаций увеличение концентраций $SO_4^{2-}$ сопровождается снижением среднего содержания щелочности и основных катионов, ионное равновесие вод становится неустойчивым, и создаются предпосылки для закисления вод [Моисеенко, 1997].

В качестве регионального фона содержание $SO_4^{2-}$ для северных стран на территориях, не испытывающих воздействия кислых осадков и не имеющих природных источников их поступления, принято считать равным 10–15 мкэкв/л, как предложено Хенриксен [Henriksen et al., 1992]. В наших исследованиях подобные низкие значения $SO_4^{2-}$ встречаются в отдаленных восточных и западных районах Мурманской области. Как известно, в Мурманской области существуют месторождения сульфидных сланцев, которые при выщелачивании способны увеличивать содержание $SO_4^{2-}$. Данные месторождения встречаются участками в северо-западном, западном и юго-восточном районах, однако фоновое значение $SO_4^{2-}$ в сульфидоносных районах в 1960-х гг. было не более 38 мкэкв/л [Гуревич, 1966]. Их влияние очень незначительно и перекрывается аэротехногенными потоками.

Результирующим показателем ионного равновесия вод считается pH. Территориальное распределение данного параметра имеет мозаичную картину (см. рис. 3). В пределах Мурманской области ландшафтно-географические условия формирования качества вод неоднородны, поэтому с учетом нагрузки, а также геологических и ландшафтных условий мы выделили несколько основных районов при анализе показателей pH. Наиболее низкие значения медианы характеризуют северо-западную и северо-восточную части региона, где преобладает тундра. Вместе с тем наибольшее количество озер с pH воды < 5 находится в юго-восточной лесотундровой зоне – 19 %. Известно, что низкие значения pH могут также определяться содержанием гумусовых кислот. Эти озера, в отличие от техногенно-закисленных, различаются содержанием органического вещества и цветностью вод. Закисление вод проявляется в снижении pH в малых озерах и в снижении буферной емкости крупных водосборов. Среди обследованных водоемов Мурманской области озера с pH < 6 составили 22,8 %. Озера с низкими значениями pH, как правило, невелики по размерам – их площадь составляет менее 1 км$^2$. В 30 % исследованных озер щелочность составляла менее 50 мкэкв/л и содержание $SO_4^{2-}$ превышало содержание гидрокарбонатов, что также предопределяет закисление вод.

**2.2. Органическое вещество и биогенные элементы в воде озер.** В лимнологических исследованиях растворенное органическое вещество измеряют прямым и косвенным методом по биологическому и химическому потреблению кислорода. Содержание всего органического вещества определяется по бихроматной окисляемости, а растворенного – по перманганатной. Соединения азота и фосфора в водных системах, если рассматривать их как лимитирующие вещества, имеют решающее значение для общей продукции планктона [Томас, 1977]. Существенны и другие

компоненты водной среды, но, как правило, не они определяют величину биопродукционного потенциала, превышение критического уровня которого наносит ущерб экосистеме водоема. Фосфор присутствует в воде в составе взвешенных веществ, органического вещества и фосфатов, азот – в виде ионов аммония, нитритов, нитратов и в органических соединениях. В целом поверхностные воды Мурманской области характеризуются низким содержанием органического вещества и биогенных элементов [Ресурсы…, 1970].

Анализ распределения органического вещества и биогенных элементов показывает сходную картину их распространения (рис. 4, 5). Прослеживается четкая тенденция нарастания значений с запада на восток Мурманской области. Более высокими концентрациями органического вещества

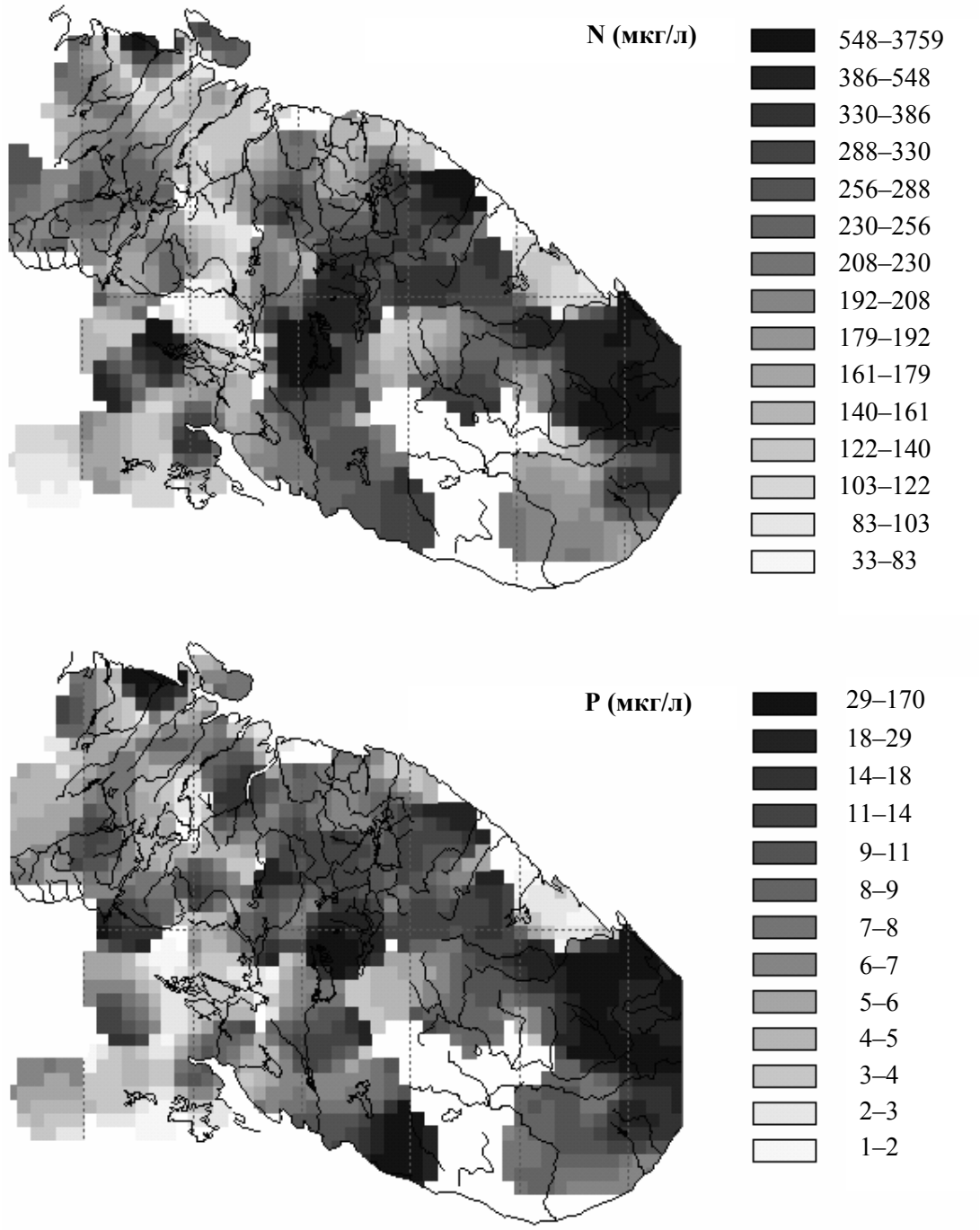



**Рис. 4.** Распределение содержания общего азота и общего фосфора в воде озер Мурманской области

**Fig. 4.** Distribution of total nitrogen and total phosphorus content in the water of lakes in the Murmansk Region

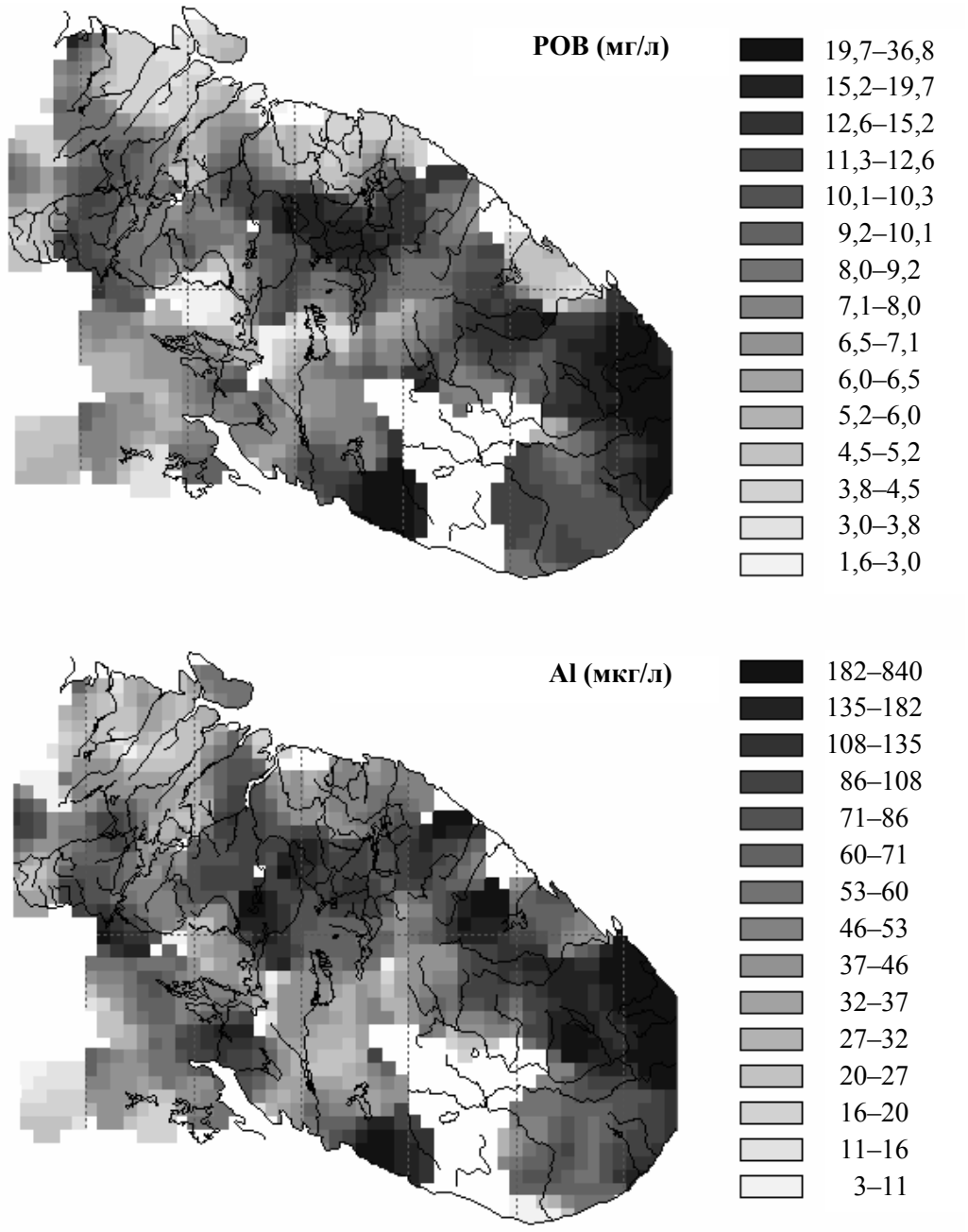



**Рис. 5.** Распределение содержания растворенного органического вещества (РОВ) и алюминия в озерах Мурманской области

**Fig. 5.** Distribution of dissolved organic matter and aluminum content in lakes of the Murmansk Region

характеризуются воды малых озер заболоченной северо-восточной тундры и лесные озера (до 36,7 и 33,6 мг/л соответственно). При этом надо отметить, что максимальное накопление всей группы рассматриваемых параметров трофического статуса наблюдается также в небольших водоемах (площадью до 1 км$^2$). Определяющими данное распределение факторами являются рельеф и степень заболоченности местности, что наиболее правомочно для тундровых зон. Самые низкие значения гидрохимических параметров продуктивности вод отмечаются в районах горной тундры, что характеризует их как ультраолиготрофные. Близки к ним и воды полярной тундры.

На водосборах востока Кольского полуострова прослеживается закономерное увеличение органического вещества и общего фосфора, а также цветности вод и железа. Формирование коричневых вод с высоким содержанием гумусовых кислот характерно для заболоченных тундровых

ландшафтов. Цветность имеет высокий уровень корреляции с содержанием органического вещества (r = 0,95, p = 0,001). Содержание азота отличается широким диапазоном в каждой группе озер, вместе с тем концентрация его минеральной формы более низкая в водах тундровой зоны (в среднем 6–7 мкг/л).

Территориальное распределение содержания фосфора и азота повторяет закономерности распределения органического вещества в северо-восточной тундровой и центральной промышленной зонах, что подтверждает их связь с развитием почвенно-растительного покрова на водосборе. Между этими параметрами существует тесная корреляционная зависимость. Регрессионные степенные зависимости содержания органического вещества выражены уравнениями:

$$N = 73{,}5\ РОВ^{0.51}\ (r = 0{,}47;\ p = 0{,}001),\ P = 1{,}4\ РОВ^{0.76}\ (r = 0{,}52;\ p = 0{,}001).$$

Факторный анализ практически во всех районах объединяет органическое вещество, цветность и железо в одну группу связанных между собой элементов [Сандимиров, 1999].

Содержание органического вещества в северо-западном и центральном промышленном районах имеет положительную корреляционную зависимость с коэффициентом заболоченности и залесенности водосборных площадей озер [Сандимиров, 1999]. Зависимости содержания органического вещества в воде озер Кольского полуострова имеют вид:

$$РОВ = 0{,}21\ k_{бол} + 3{,}13\ (r = 0{,}64;\ p = 0{,}001),$$
$$РОВ = 0{,}06\ k_{лес} + 3{,}30\ (r = 0{,}43;\ p = 0{,}001),$$

где $k_{бол}$ – коэффициент заболоченности; $k_{лес}$ – коэффициент залесенности.

Влияние размеров озер на содержание органического вещества сказывается только на озерах площадью до 1 км$^2$ (r = 0,48). Если принять во внимание особенности рельефа Мурманской области, то можно отметить увеличение содержания биогенных элементов и органического вещества с уменьшением степени холмистости местности.

Если исходить только из содержания фосфора в осенний период и по его содержанию классифицировать озера [Vollenweider, Dillon, 1979], то до 27 % озер различных ландшафтно-географических зон Мурманской области соответствуют статусу мезо- и эвтрофных, что согласуется с наличием азотной группы элементов.

**2.3. Микроэлементы в воде озер.** Микроэлементы, содержание которых в воде менее 1 мг/л, можно подразделить на элементы природного происхождения, которые поступают в водоемы при химическом выветривании слагающих водосбор пород, и элементы аэротехногенного происхождения, выпадающие из загрязненной атмосферы. Следует отметить, что кислотные осадки изменяют и природные потоки элементов с водосбора. Широко известен феномен вымывания лабильных форм алюминия в водоемы кислотными осадками [Израэль и др., 1989; Моисеенко и др., 1996]. На рис. 5 представлено распределение Al в водах озер Мурманской области, которое показывает гидрохимические аномалии его содержания, связанные, как правило, с низкими значениями pH. Проблема связанного с закислением поведения микроэлементов достаточно подробно освещена в работе [Моисеенко, 1997].

Размеры озер влияют на общее содержание микроэлементов в воде; минимальные концентрации Al и Fe характерны для наиболее крупных озер (площадью более 10 км$^2$) (см. табл. 1). Наиболее токсичными загрязняющими веществами пресных вод Мурманской области являются Ni и Cu (рис. 6). Максимальные концентрации Ni наблюдаются в малых озерах двух промышленных зон. Области его высоких значений в воде озер (более 20 мкг/л) ограничиваются 60-километровой зоной вокруг медно-никелевых металлургических предприятий. В северо-западной промышленной зоне (район влияния комбината «Печенганикель») значения Ni составляют в среднем 12,4 мкг/л, при максимальных – до 450 мкг/л, в центральной промышленной зоне (район влияния комбината «Североникель») значения Ni составляют в среднем 2,9 мкг/л, при максимальных – до 77 мкг/л. Распределение концентраций Ni имеет положительный коэффициент корреляции с содержанием $SO_4^{2-}$ в поверхностных водах. Зависимость выражена линейным уравнением:

$$Ni = 1{,}91\ SO_4 - 1{,}78\ (r = 0{,}65;\ p = 0{,}01).$$

Концентрация Cu в 60-километровой зоне значительно ниже по сравнению с Ni (в среднем 2,2–2,9 мкг/л, при максимальных – до 20 мкг/л). В эндемичных Cu-Ni геохимических провинциях, которые могут обусловливать повышенные фоновые концентрации Ni и Cu в природных водах, по данным [Гуревич, 1966], фоновое содержание Ni в поверхностных водах было 4,6 мкг/л, Cu – 3 мкг/л.

Наиболее низкие концентрации Ni и Cu отмечаются в озерах юго-восточной лесотундровой и западной лесной зон Мурманской области: Ni – 0,5 и 0,7 мкг/л, Cu – 0,65 и 0,6 мкг/л. В то же время эти величины являются достаточно высокими по сравнению с другими районами мира. Из 260 озер на западе США концентрации элементов по Ni только в 3 % превышали 0,5 мкг/л, а по Cu – в 7 % озер превышали 0,3 мкг/л [Henshaw et al., 1989]. В Мурманской области доля озер с концентрациями Ni и Cu, превышающими данные значения, составляет 67 % по Cu и 61 % по Ni даже в удаленных от промышленных центров районах.

Среди различных районов в Мурманской области по накопленным частотам Ni и Cu выделяются импактные зоны вокруг комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» (рис. 6), при этом загрязнение вод Ni преобладает в Печенгском районе. Распределение концентраций Al имеет

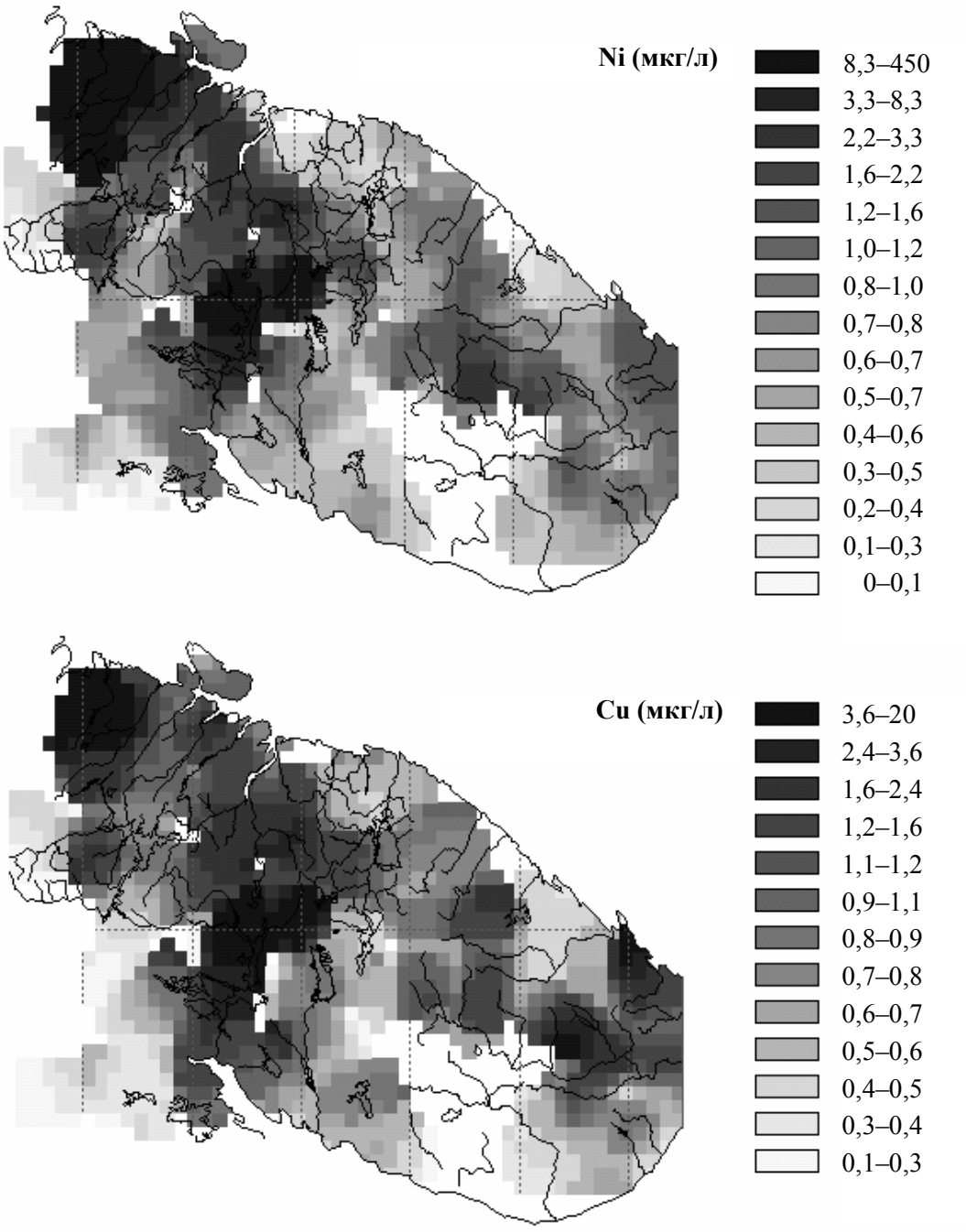



**Рис. 6.** Распределение содержания Ni и Cu в озерах Мурманской области

**Fig. 6.** Distribution of Ni and Cu content in lakes of the Murmansk Region

обратную схему: наибольшими значениями (в среднем – 74 мкг/л, максимальные – до 840 мкг/л) характеризуются мелкие озера в северо-восточной тундровой зоне, что, очевидно, определяется кислотностью их вод. Соответственно, выделяются те районы, где воды наиболее закислены.

Следует подчеркнуть, что не только Al, но и большая часть других элементов высвобождается из пород и донных отложений в закисленной водной среде [Моисеенко и др., 1996]. Даже при сохранении высокой буферной емкости вод, которая наблюдается в прилегающих к Хибинскому горному массиву озерах, под влиянием кислотных осадков происходит их обогащение ионными формами Al и Sr [Моисеенко и др., 1997]. В закисленных озерах выявлено снижение в поверхностных слоях донных отложений не только Ca, Mg, Al, но также Sr, Cd, Hg, Cu, Zn [Даувальтер, 1999].

Гидрохимические параметры наряду с климатическими, географическими, ландшафтными и геологическими условиями конкретных водосборов определяют природное состояние водных экосистем. Загрязнение водных объектов, вызывая изменения в физическом и химическом состоянии воды, приводит к нарушению экологического баланса системы.

**2.4. Гидрохимические особенности озер в зоне влияния деятельности горно-металлургического комбината.** Более чем полувековая деятельность ГМК «Печенганикель», сопровождающаяся большими объемами сброса сточных вод с повышенным содержанием элементов и поступлением загрязняющих веществ аэротехногенным путем, привела к изменению естественных геохимических циклов элементов и формированию гидрохимических аномалий в непосредственной близости от источников загрязнения природных вод. Изучение уровней содержания загрязняющих веществ и закономерностей перераспределения элементов при движении потока загрязненных вод является необходимым условием для обоснованного прогнозирования качества природных вод.

Химический состав поверхностных вод в основном определяется атмосферным выпадением ионов и выветриванием, а также ионообменной реакцией на водосборной площади. Загрязняющие вещества попадают в озера и водотоки через воздух, а также посредством прямых выбросов. Определенные процессы, происходящие на водосборной площади, оказывают влияние на химию стока. Это и биологические процессы (микробная активность, поглощение растениями, разложение), и химические процессы (выветривание, ионообменные реакции и т. д.). Концентрации тяжелых металлов в поверхностных водах зависят от нескольких факторов, таких, как воздушное антропогенное влияние и местные источники, природное выщелачивание из основной породы и почвы, а также естественная почвенная пыль. К тому же условия, преобладающие на водосборной площади, оказывают большое влияние на мобильность и доступность тяжелых металлов в воде.

Водные системы на приграничной территории России и Норвегии разделяются на два типа: большая озерно-речная система Инари – Пасвик, а также многочисленные малые озера и реки. Водораздел оз. Инари – р. Пасвик является основной пресноводной системой в регионе, площадь оз. Инари около 1250 км$^2$, а его водосборная площадь – 18 404 км$^2$. Река Пасвик берет начало в Финляндии, протекает по небольшому участку российской территории, а затем служит границей между Россией и Норвегией на протяжении 120 км. Озерно-речная система Пасвик имеет большое природное значение и обладает богатыми природными ресурсами. Рыбные ресурсы используются при промышленной добыче, в натуральном рыбном хозяйстве, а также рекреационном рыболовстве.

Данная территория испытывает серьезное антропогенное влияние, в том числе со стороны комбината «Печенганикель». Озеро Куэтсъярви и нижнее течение р. Пасвик принимают сточные воды металлургических и сопутствующих производств, расположенных в п. Никель. Вся система р. Пасвик, а также озера и реки данного района, в систему не входящие, подвергаются загрязнению посредством атмосферных выпадений. К основным загрязняющим веществам относятся соединения серы и тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd, Cr, Zn, As, Hg и др.), полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и стойкие органические загрязнители (СОЗ). Выбросы диоксида серы с комбината приводят к закислению поверхностных вод и их загрязнению вследствие интенсификации процессов выщелачивания элементов из геологических структур.

Различия и изменения в качестве вод водоемов отражают влияние комбината «Печеганикель». Сточные воды и атмосферные выбросы горно-перерабатывающих и металлургических производств привносят в окружающую среду тысячи тонн минеральных солей, что приводит к изменению общей минерализации и природного соотношения основных ионов поверхностных вод. В озерах, расположенных в непосредственной близости от площадок ГМК «Печеганикель», наблюдается высокая минерализация: вблизи пос. Приречный (87 мг/л), LN-2 (179 мг/л) и Куэтсъярви (72 мг/л), вблизи г. Никель. По мере удаления от места сброса сточных вод и атмосферных выбросов происходит закономерное снижение минерализации воды (рис. 7). Так, в остальных водоемах отмечается природная минерализация вод, характерная для большинства водоемов Кольского полуострова (в среднем 20 мг/л, в диапазоне от 4,5 до 46,2 мг/л) [Моисеенко и др., 1996].

Поступление промышленных сточных вод в водоем не только увеличивает общее содержание солей в водоеме, но также может привести к перераспределению содержания основных ионов. Для природных вод Кольского Севера типичен следующий порядок распределения главных ионов: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$; $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ + K^+$. Многолетнее поступление сточных вод привело к изменению соотношения ионов. В озерах, расположенных вблизи комбината «Печенганикель», основные ионы по значимости распределяются следующим образом: $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$; $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$, т. е. вода в настоящее время соответствует сульфатному классу.

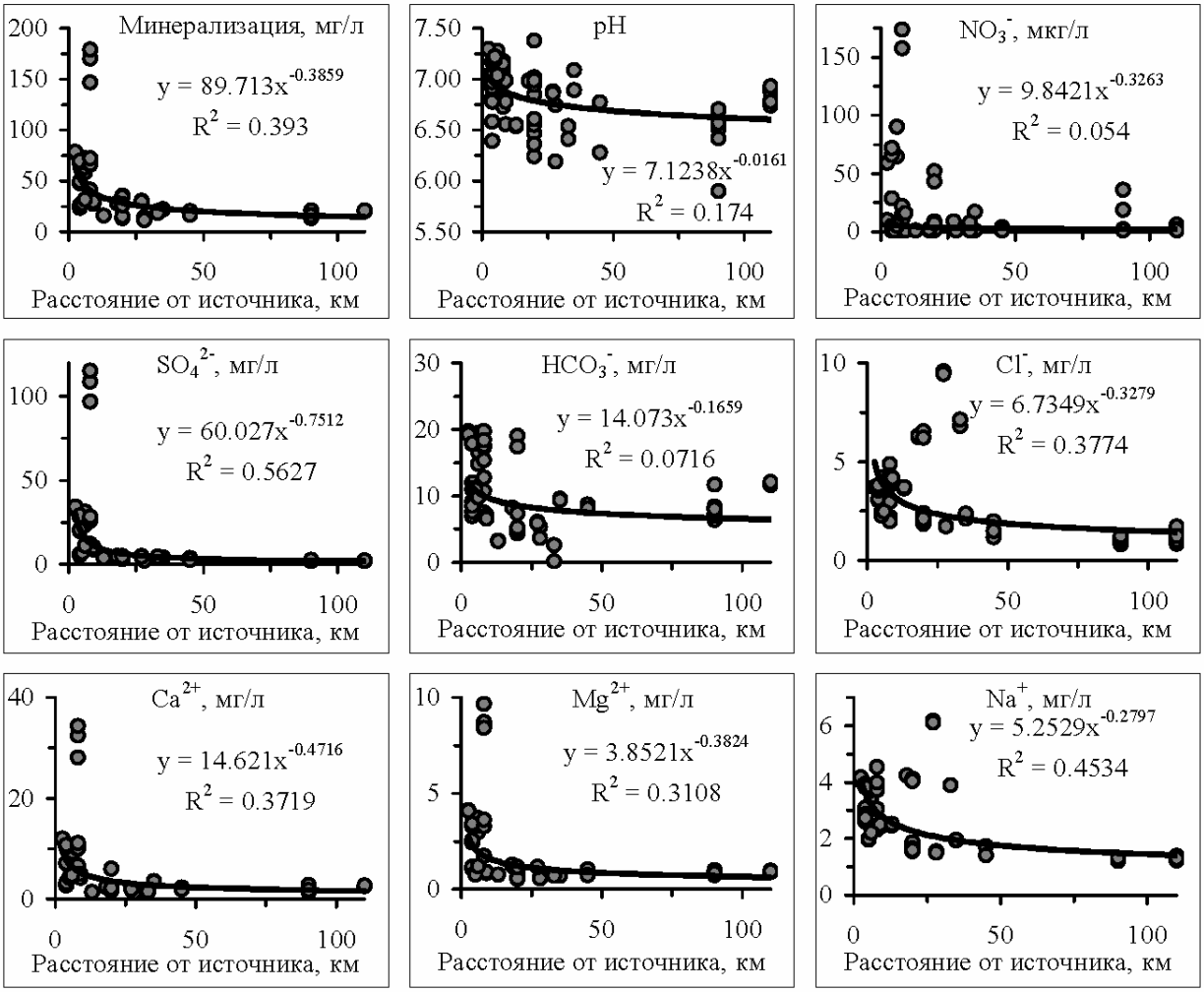



**Рис. 7.** Распределение величин общей минерализации, pH и содержания главных ионов (мг/л) в воде исследуемых озер по мере удаления от комбината «Печенганикель»

**Fig. 7.** Distribution of the values of TDS, pH, and content of main ions (mg/l) in the water of the studied lakes with distance from the Pechenganickel Company

В остальных водоемах состав исследуемых вод в основном соответствует природному распределению и относится к классу гидрокарбонатных вод. Сопоставление содержания катионов показывает, что в большинстве водоемов преобладающим катионом является $Ca^{2+}$ и на его долю приходится от 16 до 71 % в катионном составе. Значительно меньшая вариабельность наблюдается по $Na^{+}$ (0,79–4,69 мг/л), $Mg^{2+}$ (0,2–9,68 мг/л), $K^{+}$ (0,19–3,09 мг/л). В распределении главных ионов в воде исследуемых озер отмечается увеличение содержания по мере приближения к комбинату «Печенганикель» (см. рис. 7).

В исследуемом районе водородный показатель воды изменялся от 4,64 до 7,21 единиц pH. Реакция вод в большинстве водоемов слабокислая. Наименьшие значения отмечены в озерах вблизи пос. Приречный, который расположен в 40 км на юг от г. Никеля, и в придонном слое оз. Виртуовошъяур. С удалением от комбината «Печенганикель» значения pH уменьшаются (см. рис. 7), т. е. пылевые выбросы комбината оказывают подщелачивающее влияние на воду исследуемых озер вследствие большого содержания в составе пыли щелочных и щелочноземельных металлов.

Несмотря на то что выбросы $SO_2$ с комбината «Печенганикель» сократились примерно на треть от максимального уровня конца 1970-х гг., выпадение серы до сих пор оказывает воздействие на данный район. Концентрации сульфатов в озерах и реках вблизи комбината существенно выше, чем концентрации в других районах. Несмотря на высокое содержание сульфатов, озера и реки в этом районе являются достаточно буферными и не справляются с существующей кислотной нагрузкой. Основные породы в районе ГМК «Печенганикель» содержат относительно большое количество основных катионов, и таким образом, несмотря на значительное выпадение серы, на водосборной площади имеется достаточно основных катионов для предотвращения процесса закисления. Это отражается на качестве вод: озера с относительно высоким содержанием сульфатов также имеют высокие концентрации основных ионов и высокую щелочность. Выбросы пыли от комбината, горной промышленности, несомненно, влияют на концентрации основных катионов в озерах. Вместе с тем для вод системы р. Пасвик характерно весеннее снижение значений pH (до 0,5 единицы) и повышение концентраций Al (плесы Сванватн и Тъеребухта – 160 и 137 мкг/л соответственно) и Fe (плесы Рускебухта и Тъеребухта – 900 и 196 мкг/л соответственно) по сравнению с осенними значениями (Al – 18–50 мкг/л; Fe – 45–83 мкг/л). Высокие концентрации Al и Fe наблюдаются в водоемах, расположенных на значительном расстоянии от комбината «Печенганикель». В реках, впадающих в Пасвик, максимальные концентрации Al отмечены в Сейгийоки (Seigijoki) и Лауккуйоки (Laukkujoki). Максимальная концентрация Fe отмечена в р. Сейгийоки (526 мкг/л) и озерах Алла-Аккаярви и Виртуовошъяур (368 и 132 мкг/л соответственно).

В районе Ярфьёрда озера менее буферные. Здесь почва не особенно чувствительна к закислению, но каменистая, и слой ее очень тонкий. Явные признаки закисления ранее были отмечены в озерах в районе Ярфьёрда, но среднее значение pH увеличилось с 5,0 в 1987 г. до 5,4 в 2004 г. Тем не менее эти озера находятся еще в ранней стадии восстановления, и увеличение буферной способности не имеет четкого отражения в значении pH. Качество воды – основной элемент мониторинга и анализа влияния комбината «Печенганикель» на водные экосистемы. Вода представляет собой химическую среду, в которой обитают водные организмы. Качество вод более четко отражает изменения в выпадениях окисляющих соединений, чем в выпадении металлов, так как концентрации металлов больше зависят от геологических характеристик основных слагающих породы, pH и количества органического материала в почве и поверхностных водах.

Основными загрязняющими веществами с токсичным эффектом для исследуемых водоемов являются тяжелые металлы. Поступление сточных вод промышленных предприятий, содержащих значительные количества загрязняющих веществ, привело к тому, что в настоящее время содержание этих элементов в некоторых водоемах Печенгского района превышает принятые условно-фоновые значения и предельно допустимые концентрации для воды водоемов рыбохозяйственного назначения ($ПДК_{рбхз}$). Принятые в России $ПДК_{рбхз}$ для Ni и Cu – 10 и 1 мкг/л соответственно.

Зона высоких концентраций Cu и Ni распространяется на 30 км от комбината. Исследования показали, что наибольшие концентрации Ni наблюдались в водоемах, расположенных в непосредственной близости к городам Никелю и Заполярному (80–340 мкг/л) и пос. Приречный (до 1400 мкг/л). В водоемах, удаленных от комбината, содержание Ni в воде изменяется от 0,2 до 34 мкг/л (рис. 8). Концентрация Cu в воде исследуемых водоемов составляет 0,2–46 мкг/л.

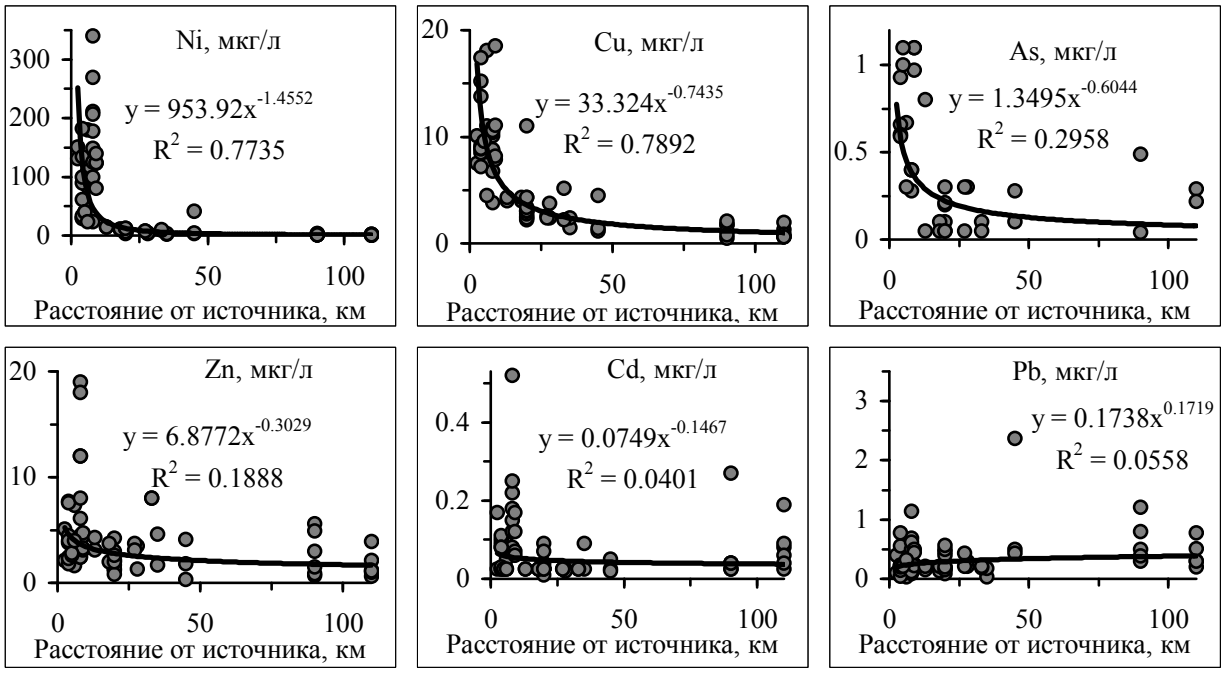



**Рис. 8.** Распределение концентраций основных загрязняющих элементов (мкг/л) в воде озер по мере удаления от комбината «Печенганикель»

**Fig. 8.** Distribution of the concentrations of the main polluting elements (μg/l) in the water of lakes with distance from the Pechenganickel Company

Наиболее высокие концентрации этого элемента отмечены в оз. Куэтсъярви (до 126–133 мкг/л) и в районе плесов Бъернватн и Скрюккебукта (19,5 и 8,7 мкг/л соответственно). В верхнем течении р. Пасвик содержание Ni в воде составляет 0,3–1,9 мкг/л. Содержание Cu в оз. Куэтсъярви – 8,4–9,1 мкг/л. Более высокие значения меди и никеля наблюдаются весной, что обусловлено поступлением загрязняющих веществ с талыми водами во время половодья. Наибольшие концентрации Ni наблюдались в озерах LN-2, LN-3, Палоярви, Шуонияур (10,1–293 мкг/л), в реках Пахта и Шуонийоки (40 и 35 мкг/л соответственно). Концентрации Cu и Ni уменьшаются по мере увеличения расстояния от комбината, хотя относительно высокие концентрации также встречаются на территории Финляндии, возле границы. Вблизи комбината отмечается накопление металлов в органах и тканях рыб, а также наблюдаются патологии рыб.

В весенний период из оз. Куэтсъярви в р. Пасвик Ni и Cu поступает в 2 раза больше, чем в летний и осенний периоды. Содержание таких элементов, как Co, Zn, Pb, Cr, Cd, незначительно и очень редко превышает $ПДК_{рбхз}$. Концентрации практически всех тяжелых металлов (кроме Pb) в воде исследуемых озер снижаются по мере удаления от комбината «Печенганикель» (см. рис. 7).

**2.5. Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области по содержанию тяжелых металлов в воде.** Особенности функционирования водных экосистем в современных условиях (увеличение токсичности водной среды, радикальные структурно-функциональные перестройки сообществ гидробионтов, изменение трофического статуса водоемов, снижение стабильности пресноводных экосистем, повышение рисков катастрофических деградационных изменений [Kashulin et al., 2017; Кашулин и др., 2018]) требуют пересмотра критериев и методологических подходов к оценке качества поверхностных вод и организации системы гидроэкологического мониторинга. При разработке показателей качества пресных вод необходимо учитывать современное состояние и региональные особенности водоемов, например, фоновые концентрации элементов в поверхностных водах. Предлагается за основу брать концентрации тяжелых металлов в условно фоновых водоемах, удаленных от крупных промышленных источников. К примеру, озера восточной части Мурманской области располагаются на достаточном расстоянии от горно-металлургических предприятий (более 100 км), чтобы отнести их к незагрязненным тяжелыми металлами, т. е. «фоновым».

Фоновые концентрации тяжелых металлов в воде ($\Phi_n^i$) определяли как медианное значение (М) концентраций каждого конкретного элемента в 400 озерах восточной части Мурманской области [Кашулин и др., 2010, 2011] плюс одно стандартное отклонение. Использовали именно медианное, а не среднее значение, так как озера расположены в разных ландшафтно-географических зонах (тундровая, таежная, горная) с различными геохимическими особенностями водосборов, что сказывается на значительных вариациях концентраций элементов. Следовательно, данный метод статистического определения учитывает тот факт, что разные типы водоемов могут иметь различные концентрации тяжелых металлов. Если концентрации конкретных элементов в озерах имеют низкий разброс, тогда сумма $M + s_n$ будет близка к М; если разброс велик, сумма рассчитывается статистически достоверным способом. Для определения интенсивности загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области тяжелыми металлами по показателю $\Phi_n^i$ предложена следующая классификация: $\Phi_f^i < 1$ – фоновое содержание элемента в воде (низкое загрязнение поверхностных вод данным элементом), $1 \le \Phi_f^i < 5$ – умеренное, $5 \le \Phi_f^i < 10$ – значительное, $\Phi_f^i \ge 10$ – высокое загрязнение (табл. 2).

**Таблица 2.** Оценка степени загрязнения пресноводных водоемов Мурманской области на основе анализа концентраций тяжелых металлов

**Table 2.** Assessment of the degree of freshwater pollution in the Murmansk Region based on the analysis of heavy metal concentrations

| Элемент | Содержание элемента в воде, мкг/л | | | | | | | Степень загрязнения водоема | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | M* | X | min | max | $s_n$ | $M+s_n$ | $\Phi_n^i$ | фоновое | умеренное | значительное | сильное |
| Zn | 1,7 | 2,6 | 0,0 | 24,0 | 3,1 | 4,82 | 5,0 | < 5 | 5,0–25,0 | 25,0–50,0 | > 50 |
| Cu | 0,7 | 1,37 | 0,0 | 22,0 | 2,5 | 3,19 | 3,0 | < 3 | 3,0–15,0 | 15,0–30,0 | > 30 |
| Ni | 0,6 | 1,0 | 0,0 | 9,0 | 1,2 | 1,77 | 2,0 | < 2 | 2,0–10,0 | 10,0–20,0 | > 20 |
| Co | 0,2 | 0,3 | 0,0 | 8,0 | 0,8 | 1,00 | 1,0 | < 1 | 1,0–5,0 | 5,0–10,0 | > 10 |
| Pb | 0,3 | 0,34 | 0,0 | 1,4 | 0,24 | 0,54 | 0,5 | < 0,5 | 0,5–2,5 | 2,5–5,0 | > 5 |
| Cd | 0,05 | 0,10 | 0,0 | 0,99 | 0,16 | 0,21 | 0,2 | < 0,2 | 0,2–1,0 | 1,0–2,0 | > 2 |
| As | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,25 | 0,096 | 0,106 | 0,1 | < 0,1 | 0,1–0,5 | 0,5–1,0 | > 1 |

*Примечание.* Концентрации элементов: М – медианные, X – средние, min – минимальные, max – максимальные, $\Phi_n^i$ – фоновые доиндустриальные; $s_n$ – стандартное отклонение. * Рассчитано на основе концентраций ТМ в воде 400 озер восточной части Мурманской области [Кашулин и др., 2010, 2011].

Сравнение предлагаемых критериев с существующими нормативными величинами для водоемов России – предельно допустимыми концентрациями ТМ для вод рыбохозяйственных водоемов [$ПДК_{рбхз}$, Перечень…, 1999] и санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами для питьевой воды [СанПиН, Санитарно-эпидемиологические…, 2002] показало значительное различие, отражающее региональные геохимические особенности формирования химического состава поверхностных вод (табл. 3).

**Таблица 3.** Предельно допустимые концентрации [$ПДК_{рбхз}$, Перечень…, 1999] и Санитарно-эпидемиологические нормативы для питьевой воды [СанПиН, Санитарно-эпидемиологические…, 2002]

**Table 3.** Maximum permissible concentrations [List of fishery standards…, 1999] and Sanitary and epidemiological standards for drinking water [Sanitary and Epidemiological…, 2002]

| Элемент | $ПДК_{рбхз}$, мкг/л | СанПиН, мкг/л | |
|---|---|---|---|
| | | Первая категория | Высшая категория |
| Hg | 0,01 | 0,5 | 0,2 |
| Cu | 1 | 1000 | 1000 |
| Cd | 5 | 1 | 1 |
| Ni | 10 | 20 | 20 |
| Zn | 10 | 5000 | 3000 |
| Co | 10 | 100 | 100 |
| As | 50 | 10 | 6 |
| Pb | 100 | 10 | 5 |

Подобный подход применялся при разработке критериев оценки степени загрязнения тяжелыми металлами пресноводных водоемов Канады и Норвегии. Критерии, установленные Министерством окружающей среды Канады [Sediment…, 2018], основаны на содержании в воде карбоната кальция $CaCO_3$, определяющего кислотно-щелочные условия, степень минерализации и другие гидрохимические показатели водоемов. В зависимости от содержания $CaCO_3$ предельно допустимые концентрации тяжелых металлов (например, Ni и Pb) могут отличаться в 5–7 раз (табл. 4, 5).

**Таблица 4.** Критерии оценки степени загрязнения пресноводных водоемов тяжелыми металлами (мкг/л), принятые в Канаде [Sediment…, 2018] и Норвегии [Molvær et al., 1997]

**Table 4.** Criteria for assessing the degree of freshwater pollution with heavy metals (μg/l) used in Canada [Sediment ..., 2018] and Norway [Molvær et al., 1997]

| Элемент | Критерии (степень загрязнения) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Канада | Норвегия | | | | |
| | | фоновое | умеренное | заметное | сильное | очень сильное |
| Cd | 0,017 | < 0,04 | 0,04–0,1 | 0,1–0,2 | 0,2–0,4 | > 0,4 |
| Hg | 0,1 | < 0,002 | 0,002–0,005 | 0,005–0,01 | 0,01–0,02 | > 0,02 |
| Pb | 1–7 | < 0,5 | 0,5–1,2 | 1,2–2,5 | 2,5–5,0 | > 5 |
| Cu | 2–4 | < 0,6 | 0,6–1,5 | 1,5–3,0 | 3,0–6,0 | > 6 |
| As | 5,0 | < 0,5 | 0,5–2,5 | 2,5–5,0 | 5,0–10,0 | > 10 |
| Ni | 25–150 | – | – | – | – | – |
| Zn | 30 | < 5 | 5–20 | 20–50 | 50–100 | > 100 |

Согласно методике определения интенсивности загрязнения вод, разработанной Комитетом охраны окружающей среды Норвегии [Molvær et al., 1997], в зависимости от превышения концентраций ТМ над фоновыми значениями водоемы подразделяются на 5 классов: с фоновым (background), умеренным (moderate), заметным (marked), сильным (strong) и очень сильным (very strong) загрязнением.

**Таблица 5.** Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в воде (ПДК, мкг/л) в зависимости от содержания карбоната кальция (мг/л)

**Table 5.** Maximum permissible concentrations of heavy metals in water (μg/l) depending on calcium carbonate content (mg/l)

| ПДК тяжелых металлов, мкг/л | Pb | | | | Cu | | | Ni | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 4 | 7 | 2 | 3 | 4 | 25 | 65 | 110 | 150 |
| Содержание $CaCO_3$, мг/л | 0–60 | 60–120 | 120–180 | > 180 | 0–120 | 120–180 | > 180 | 0–60 | 60–120 | 120–180 | > 180 |

**Заключение.** Заполярное расположение Мурманской области, близость к незамерзающему Баренцеву морю, климатические и геологические условия обуславливают специфические особенности формирования химического состава воды озер исследуемого региона в условиях антропогенного пресса.

Территория Мурманской области относится к холодной гумидной зоне. Здесь выделяются лесотундровый, северотаежный и горный ландшафты. Геохимические различия этих ландшафтов выражаются в характере мобилизации и переноса веществ и определяются зональными (природно-климатическими) и азональными (характер рельефа и почвообразующих пород) факторами.

Функционирование горно-металлургического комплекса в Мурманской области ведет к загрязнению озер сточными водами, содержащими тяжелые металлы, взвешенные вещества, минеральные соли, токсичные органические вещества – флотореагенты. Территория водосборов озер Мурманской области интенсивно загрязняется аэротехногенным путем. Выбросы соединений серы вызывают закисление малых озер и рек, кислотные осадки способствуют вымыванию металлов в водоемы. С пылеватыми выбросами разносятся тяжелые металлы, вызывая токсичное загрязнение вод. Сопоставление схем распределения показателей pH, органического вещества, суммы катионов и щелочности в водоемах позволяет выделить зоны закисления с учетом ведущего фактора: в горной тундре, центральной и северо-западной части региона закисление вод

определяется вытеснением гидрокарбонатов сульфатами; в восточной – заболоченной тундре и лесной зоне – кислотность озер связана с органическим веществом, влияние которого усиливается техногенными сульфатами.

Результаты широкомасштабных исследований подтвердили ряд общеизвестных положений об относительно низких концентрациях фосфора, азота и органического вещества в озерах Кольского Севера. Анализ территориального распределения биогенных элементов и органического вещества выявляет их увеличение по направлению к заболоченной тундре и лесотундре, а также с севера на юг – от зон тундры к лесотундре и тайге. Сопоставление содержания элементов в поверхностных водах с картой почвенно-растительного покрова показывает, что данное увеличение закономерно и связано с развитием лесных и болотных водосборов (юго-восточная часть Кольского полуострова).

Сравнение предлагаемых нормативов с разработанными нормами в Канаде и Норвегии обнаруживает, что они достаточно сопоставимы и могут быть предложены в качестве критериев оценки степени загрязнения тяжелыми металлами пресноводных водоемов Мурманской области. Приведенные критерии разработаны впервые и носят предварительный характер. Для расширения списка контролируемых показателей и обоснования их количественных характеристик требуется более глубокая проработка данного вопроса.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какая методика отбора проб воды применяется для изучения гидрохимии озер Мурманской области?
2. Какие ионы определяют минерализацию воды озер Мурманской области?
3. Какая закономерность прослеживается в распределении органического вещества и биогенных элементов в воде озер Мурманской области и с чем это связано?
4. Какие микроэлементы являются основными загрязняющими веществами для озер Мурманской области?
5. Какие критерии используются для оценки загрязнения вод озер Мурманской области?

## Литература


*Алекин О. А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 217 с.

*Гуревич В. И.* Отчет о гидрохимических исследованиях в Аллареченском никеленосном районе. Апатиты. Фонды КНЦ РАН, 1966. 215 с.

*Даувальтер В. А.* Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): автореф. дис. ... докт. географ. наук. М., 1999. 52 с.

*Израэль Ю. А., Назаров И. М., Прессман А. Я., Ровинский Ф. Я., Рябошапко А. Г., Филиппова Л. М.* Кислотные дожди. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 269 с.

*Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Валькова С. А.* Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Баренцева моря). В 2-х ч. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. Ч. 1. 249 с. Ч. 2. 128 с.

*Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Вандыш О. И., Валькова С. А.* Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Белого моря). В 2-х ч. Апатиты: КНЦ РАН, 2011. Ч. 1. 221 с. Ч. 2. 235 с.

*Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Кашулин А. Н., Зубова Е. М., Королева И. М., Косова А. Л., Черепанов А. А.* Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2018. Т. 9, вып. 6. С. 34–86.

*Лозовик П. А.* Достижения и перспективы исследований в современной гидрохимии // Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 46–55.

Методы экологических исследований водоемов Арктики / С. С. Сандимиров [и др.]. Мурманск: МГТУ, 2019. 180 с.

*Моисеенко Т. И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с.

*Моисеенко Т. И., Родюшкин И. В., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П.* Формирование качества поверхностных вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водосборы арктического бассейна. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 264 с.

*Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Родюшкин И. В.* Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 128 с.

Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

*Раткин Н. Е.* Закономерности аэротехногенного загрязнения снежного покрова (на примере Печенгского района): автореф. дис. … канд. наук. Апатиты, 1996. 24 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. Ю. А. Елшина. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. Т. 1. 316 с.

*Сандимиров С. С.* Пространственно-временные закономерности формирования химического состава поверхностных вод Мурманской области: дис. ... канд. геогр. наук. Апатиты, 1999. 167 с.

Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.4.1116-02 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества», 2002. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tehbez.ru/Docum/DocumShow_DocumID_569.html.

*Томас Ю. А.* Фосфор и эвтрофикация // Фосфор в окружающей среде. М.: Мир, 1977. С. 638–666.

*Henriksen A., Kamari I., Posch M., Wilander A.* Critical loads of acidification: Nordic surface waters // AMBIO. 1992. Vol. 21. P. 356–363.

*Henshaw J. M., Heithmar E. M., Hinners T. A.* Trace elements speciation // Anal. Chem. 1989. Vol. 61, N 1. P. 335–342.

*Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Kashulin A. N.* Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia // Envir. Science and Health, Part A. 2017. Vol. 52, N 9. P. 921–929.

*Molvær J., Knutsen J., Magnusson J., Rygg B., Skei J., Sørensen J.* Classification of environmental quality in fjords and coastal waters. A guide. Norwegian Pollution Control Authority, 1997. SFT TA-1467/1997.

Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Environmental Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2018. Retrieved September 4, 2018, from http://st-ts.ccme.ca/en/index.html.

*Vollenweider R. A., Dillon P. I.* The application of the phosphorus loading concept to eutrophycation research // Nat. Res. Coun. Canada, 1979. N 13690. 42 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Даувальтер Владимир Андреевич**
главный научный сотрудник,
профессор, д.г.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: v.dauvalter@ksc.ru

**Сандимиров Сергей Степанович**
старший научный сотрудник, к.г.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: s.sandimirov@ksc.ru

## CONTRIBUTORS:

**Dauvalter, Vladimir**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: v.dauvalter@ksc.ru

**Sandimirov, Sergey**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: s.sandimirov@ksc.ru

УДК 550.4:551.312 (470.21)

# ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**В. А. Даувальтер, З. И. Слуковский**

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,*
*ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрены основные закономерности химического состава донных отложений озер Мурманской области и приграничных территорий Норвегии и Финляндии. Дано описание фоновых концентраций элементов и соединений в донных отложениях, вертикального и территориального распределения элементов и соединений в донных отложениях озер. Предложены показатели оценки экологического состояния водоемов Мурманской области на основе содержания элементов и соединений в донных отложениях.

**Ключевые слова:** донные отложения; Арктическая зона Российской Федерации; загрязнение; качество поверхностных вод.

## CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE SEDIMENTS IN THE MURMANSK REGION

**V. A. Dauvalter, Z. I. Slukovskii**

*Institute of North Industrial Ecology Problems,*
*Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*

**Summary.** We look into the main regularities in the chemical composition of lake sediments in the Murmansk Region and border areas of Norway and Finland. A description is given of the background concentrations of elements and compounds in lake sediments, the vertical and areal distribution of elements and compounds in the sediments. Indicators are proposed for assessing the ecological state of reservoirs in the Murmansk Region based on the content of elements and compounds in lake sediments.

**Keywords:** sediments; Arctic zone of the Russian Federation; pollution; surface water quality.

**Тема.** «Химический состав донных отложений озер Мурманской области».

**Цель.** Описать специфические особенности формирования химического состава донных отложений озер Мурманской области с целью оценки экологического состояния водоемов.

**Задачи.** Образовательная задача: описание особенностей формирования химического состава донных отложений озер. Личностная задача: формирование понимания значимости знаний о химическом составе донных отложений озер в практической жизни людей; осознание необходимости охраны озер от загрязнения. Познавательная задача: формирование интереса к исследовательской деятельности. Коммуникативная задача: выстраивание позитивных отношений в процессе учебной и познавательной деятельности. Предметная задача: усвоение понятий, знание геохимических показателей, умение правильно показывать крупные озера Мурманской области на географической карте, объяснять причинно-следственные связи, определять экологические угрозы и риски водным ресурсам. Метапредметная задача: оперирование геохимическими понятиями и терминами.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Материалы и методы.

2. Результаты и обсуждение.

2.1. Фоновые концентрации элементов и соединений в донных отложениях.

2.2. Изменение концентраций элементов в донных отложениях во временном интервале.

2.3. Территориальное распределение элементов в поверхностных донных отложениях водоемов.

2.4. Оценка экологического состояния поверхностных вод по результатам исследования химического состава донных отложений водоемов.

Заключение.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** Подготовлена презентация «Особенности формирования химического состава донных отложений озер Кольского Севера». В презентации приведена характеристика озер Мурманской области, дана классификация озер по химическому составу донных отложений, показаны примеры озер Мурманской области.

## Изложение материала

**Введение.** Как известно, водоемы служат коллекторами всех видов загрязнения. Донные отложения (ДО) водоемов являются важным источником информации о климатических, геохимических, экологических условиях, существовавших на водосборе и в самом водоеме, сохраняют сведения о потоках веществ в окружающей среде в историческом срезе и позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной среды. Регионы Европейской Арктики имеют специфические особенности формирования химического состава поверхностных вод и ДО озер. Поведение техногенно-внесенных веществ в высоких широтах отличается в силу климатических и ландшафтно-географических особенностей, а их токсичные свойства проявляются более активно в низкоминерализованных и низкотемпературных водах вследствие низкой скорости массоэнергообмена и более бедного видового состава водных экосистем субарктики по сравнению с таковыми умеренных широт [Моисеенко, 1997].

В большинстве водных систем концентрации элементов в верхних слоях ДО намного выше, чем концентрации элементов, растворенных в водной толще. Следовательно, невозможно получить достоверные результаты по распределению, геохимической миграции и доступности для живых организмов элементов и веществ, находящихся в водных объектах (толще воды и ДО), и определить или предсказать их влияние на окружающую среду посредством только отбора проб воды. Поэтому ДО должны быть тщательно исследованы при оценке качества водоемов по следующим причинам:

1) участки накопления ненарушенных ДО водоемов фиксируют все изменения геохимических условий на территории водосбора. Отбор колонок ДО позволит изучать изменения геохимических условий во времени, установить фоновые уровни, с которыми можно будет сравнивать и сопоставлять существующие условия;

2) под влиянием изменения физико-химических условий окружающей среды (например, pH, Eh, содержания растворенного кислорода, бактериальной активности) связанные с ДО элементы могут переходить в водную толщу, поступать в пищевую цепь и оказывать существенное влияние на окружающую среду;

3) некоторые относительно инертные или безвредные для окружающей среды вещества могут разрушаться или реагировать с другими, образуя растворимые и потенциально токсичные формы (например, переход элементарной ртути в метилртути);

4) ДО могут рассматриваться как один из главных источников загрязнения водной среды.

Следовательно, их необходимо исследовать для определения путей потенциальной геохимической миграции загрязняющих веществ. Под влиянием изменения гидрологических условий (например, сильный шторм или весеннее половодье) вероятность загрязнения водных объектов за счет аккумулированных в ДО соединений может увеличиться; это загрязнение может привести к значительному негативному воздействию на гидробионты и в конечном счете – на человека.

**1. Материалы и методы.** За более чем тридцатилетний период существования ИППЭС КНЦ РАН исследования химического состава ДО проведены более чем на 400 малых озерах и станциях

крупных озер Мурманской области, а также приграничных районов Финляндской Лапландии и северной части Норвегии. Исследования ДО водоемов проводились, главным образом, для решения следующих задач [Даувальтер, 1999]:

1. Определение фоновых концентраций элементов и соединений в ДО озер, с которыми могут быть сравнены их содержания в поверхностном слое, отражающие современную экологическую ситуацию.

2. Вертикальное распределение элементов и соединений в колонках ДО для описания истории развития водных экосистем.

3. Пространственное распределение элементов и соединений в поверхностном слое ДО для установления источников поступления загрязняющих веществ.

4. Оценка экологического состояния водоемов с помощью разработанных критериев качества водных экосистем на основе содержания элементов и соединений в ДО.

Отбор проб ДО водоемов производится отборником колонок гравитационного типа из наиболее глубоких частей исследуемых озер, в зонах максимальной седиментации, в которых происходит непрерывное осаждение тончайших частиц, являющихся активными сорбентами загрязняющих веществ. При отборе соблюдается ненарушенность отобранных колонок. Колонки ДО разделяются на слои по 1 см (реже 2 и более см), помещаются в полиэтиленовые контейнеры и отправляются в лабораторию для анализа, где хранятся при температуре 4 °С до анализа. Первичная обработка проб ДО (высушивание, определение влажности, прокаливание и определение потерь при прокаливании) и определение содержания химических элементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Cr, As, Hg, Fe, Mn, Al, Na, K, Ca, Mg, Sr) методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии проводится в центре коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (г. Апатиты) и масс-спектрометрическим методом в аналитическом центре Института геологии Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск). Контроль точности определения содержания химических элементов проводился анализом стандартного образца L6M (проба ДО, Центр окружающей среды Финляндии (SYKE) 06/2008). Подробнее методика проведения отбора и химического анализа ДО озер описана ранее [Даувальтер, 1999, 2012; Методы…, 2019; Шелехова и др., 2020; Slukovskii, 2020a, b].

## 2. Результаты и обсуждение

**2.1. Фоновые концентрации элементов и соединений в донных отложениях.** Определение фоновых концентраций элементов в ДО является одним из важных вопросов при исследовании загрязнения озер. Для решения этой проблемы существуют два подхода:

1) установление основных геохимических фоновых уровней элементов (кларков) в соответствии с данными [Turekian, Wedephol, 1961; Виноградов, 1962];

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

В первом случае игнорируются все местные особенности формирования ДО, во втором – 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, т. е. 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.

Фоновые доиндустриальные значения определялись по методу [Håkanson, 1980], который рассчитал фоновые значения концентраций элементов для ДО озер Швеции на основе данных около 50 озер различных размеров, географического положения, трофического состояния и других лимнологических характеристик (табл. 1). Фоновые доиндустриальные значения ($C_n^i$) для каждого элемента определялись как среднее значение плюс одно (1) стандартное отклонение. Данный метод статистического определения берет в расчет тот факт, что разные типы ДО в различных озерах могут иметь различные концентрации веществ. Если концентрации показывают низкую степень разброса, тогда сумма ($X + s_n$) будет близка к X; если существует большой разброс, тогда сумма рассчитывается статистически достоверным способом. Для сравнения использовались данные о среднем содержании ТМ в земной коре [Виноградов, 1962].

**Таблица 1.** Средние (X) фоновые минимальные (min) и максимальные (max) концентрации элементов (мкг/г сух. веса), стандартные отклонения ($s_n$) и доиндустриальные значения ($C_n^i$, $X + s_n$) в ДО скандинавских [Håkanson, 1980] и исследованных озер Мурманской области

**Table 1.** Average (X) minimum (min) and maximum (max) background concentrations of elements (μg/g d.w.), standard deviations ($s_n$), and pre-industrial levels ($C_n^i$, $X + s_n$) in sediments of Scandinavian [Håkanson, 1980] and surveyed Murmansk Region lakes

| Параметр | ОП | Скандинавские озера | | | Исследуемые озера Мурманской области | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | X | $s_n$ | $C_n^i$, $X + s_n$ | X | min | max | $s_n$ | $C_n^i$, $X + s_n$ |
| Cu | 57 | 28,7 | 12,5 | 50 | 44,2 | 2,5 | 295,8 | 47,4 | 90 |
| Ni | 95 | 49,7 | 20,5 | 75 | 29,3 | 4,3 | 187,0 | 21,6 | 50 |
| Zn | 80 | 110,6 | 55,3 | 175 | 101,9 | 10,1 | 595,0 | 83,8 | 185 |
| Co | 20 | 18,5 | 10,9 | 30 | 13,2 | 1,0 | 60,0 | 13,5 | 25 |
| Cd | 0,3 | 0,58 | 0,41 | 1,0 | 0,96 | 0,07 | 5,20 | 1,18 | 2,0 |
| Pb | 20 | 34,9 | 32,9 | 70 | 7,4 | 1,0 | 62,0 | 10,3 | 20 |
| Hg | 0,4 | 0,12 | 0,11 | 0,25 | 0,071 | 0,003 | 0,190 | 0,048 | 0,12 |
| Mn | 670 | 860 | 260 | 1200 | 723 | 5 | 18 221 | 2409 | 3000 |
| Fe | 33 300 | 26 700 | 9200 | 36 000 | 28 471 | 217 | 177 466 | 35 766 | 65 000 |
| K | 22 800 | – | – | – | 922 | 48 | 3898 | 853 | 1800 |
| Na | 6600 | – | – | – | 391 | 20 | 4315 | 796 | 1200 |
| Sr | 450 | – | – | – | 40,2 | 1,0 | 1023,1 | 115,2 | 150 |
| Ca | 25 300 | – | – | – | 3635 | 4 | 61 656 | 8447 | 12 000 |
| Mg | 13 400 | – | – | – | 2287 | 136 | 14 600 | 2310 | 4600 |
| Cr | 100 | 48,7 | 34,4 | 90 | 52 | 5 | 495 | 94 | 150 |
| Al | 104 500 | 26 000 | – | – | 16 799 | 603 | 118 583 | 16 167 | 32 966 |
| Ti | 4500 | – | – | – | 1562 | 117 | 7000 | 2371 | 3933 |

*Примечание.* ОП – среднее содержание в осадочных породах [Виноградов, 1962].

При подсчете степени загрязнения очень важно иметь достоверные значения фоновых концентраций. Вместе с тем не существует метода, который мог бы учесть все факторы, влияющие на фоновые концентрации. Как упрощение обычно определяются минимальные значения, которые фиксируются вертикально в колонках ДО как фоновые значения. Фоновые значения характерны для ДО, отложившихся более 200 лет тому назад, которые характеризуют период до любого заметного загрязнения.

Фоновые ДО формировались в период, когда, вероятно, были незначительные региональные различия в атмосферной нагрузке. Важно подчеркнуть, что такая оценка может быть использована только в тех случаях, когда поток элементов в атмосферных выпадениях стабилен (т. е. в доиндустриальные периоды или в отдаленных фоновых территориях). В табл. 1 приводятся значения фоновых концентраций элементов.

**2.2. Изменение концентраций элементов в донных отложениях во временном интервале.** Исследование химического состава толщи ДО позволяет восстановить историю условий их формирования для отдельных озер на основе определения фоновых значений содержания элементов в ДО и изменений их поступления в течение длительного периода времени. Эти исследования актуальны для территорий с высокоразвитой горнопромышленной индустрией, где существует аномальное распределение элементов вследствие геохимических особенностей и антропогенного влияния на них. Особую научную значимость они приобретают, когда известна скорость осадконакопления.

Спокойные ненарушенные места аккумуляции ДО могут содержать 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), исследователь может установить химические изменения во времени, и становится возможным установить фоновые значения для данной территории, которые могут быть сравнены с существующими условиями. Когда химические анализы используются вместе с методикой радиометрического датирования ($^{210}$Pb, $^{14}$C), могут быть оценены исторические изменения качества воды во времени. Средние скорости осадконакопления в озерах Мурманской области и приграничных территорий Норвегии и Финляндии за последние полтора столетия находятся в пределах 0,3–0,6 мм/год до 1,0–1,6 мм/год, в среднем составляют 1,0 мм/год [Даувальтер и др., 2015].

Концентрации ТМ (Ni, Cu, Pb, As и Cd) в датируемых ДО исследуемых озер показаны на рис. 1 и 2. В целом по исследуемым озерам отмечено увеличение концентраций Ni и Cu, датируемое 1930–1940-ми гг. (см. рис. 1), связанное с началом горно-металлургической деятельности на территории

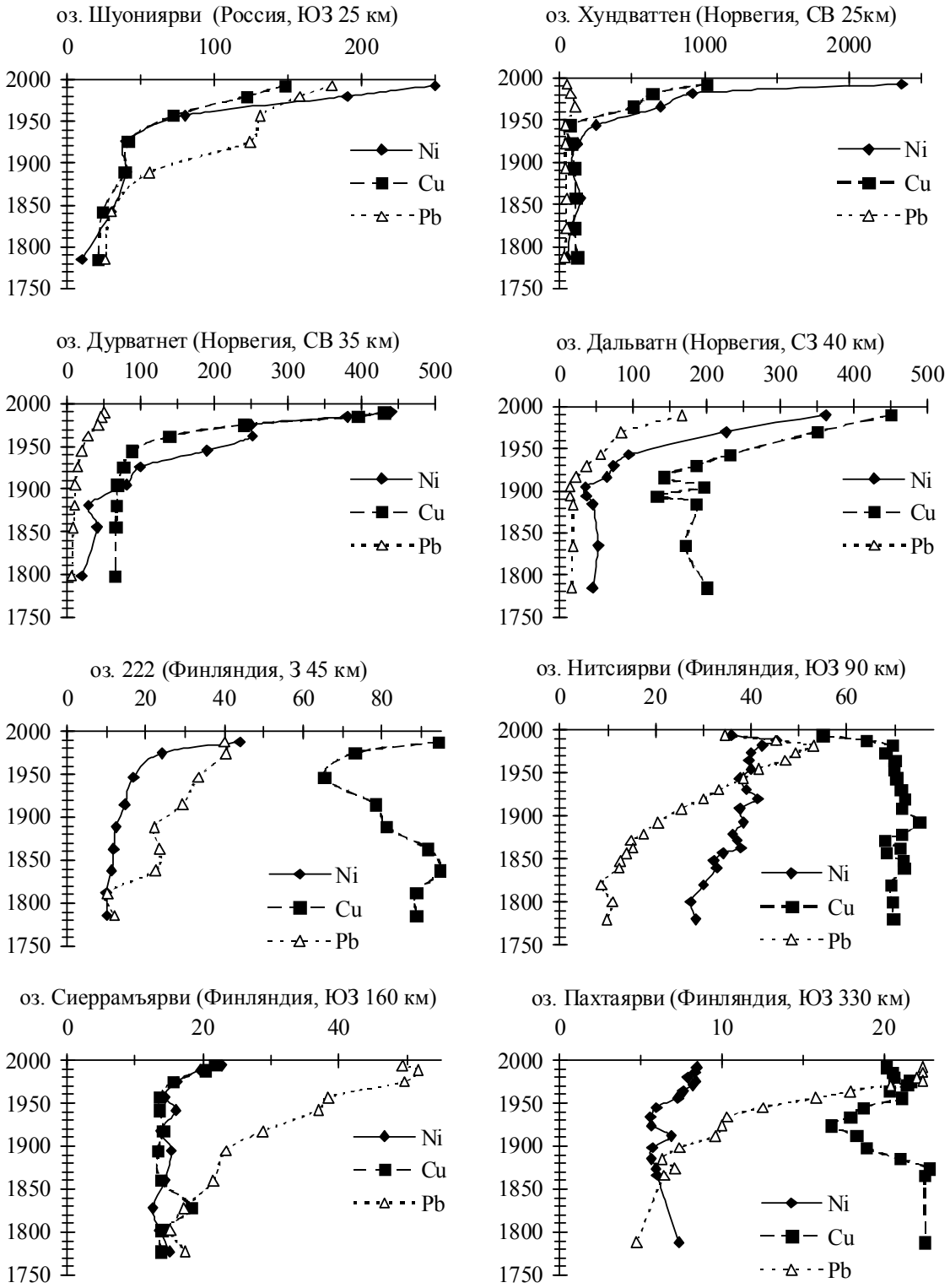



**Рис. 1.** Концентрации (мкг/г) Ni, Cu, Pb в датируемых ДО озер на различном удалении от комбината «Печенганикель»

**Fig. 1.** Concentrations (μg/g) of Ni, Cu, Pb in the dated sediments from lakes at different distances from the Pechenganickel smelter

Северной Норвегии и Печенгского района. Явно эта тенденция выражена в российском (оз. Шуониярви) и норвежских озерах, а также финляндских, расположенных ближе с российской границе (№ 222 и Нитсиярви). С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО и снижается разброс содержаний в целом по колонке. Значительное увеличение концентраций Pb датируется концом XIX – началом XX в. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных загрязнителей. Особенно это характерно для финляндских озер.

Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат также As и Cd (см. рис. 2). К сожалению, концентрации As определялись только в финляндских озерах. Начало загрязнения As и Cd датируется серединой XIX в. Это загрязнение связано с развитием промышленности в Европе и России и с воздушным трансграничным переносом загрязняющих веществ в высокие широты. Освоение северных территорий и дальнейшее развитие промышленности в Европе сказалось в следующем увеличении концентраций As и Cd в начале текущего столетия. Резкое повышение концентраций As и Cd в середине XX в. связано с развитием промышленности в послевоенные годы. Концентрации As в поверхностных слоях ДО озер Нитсиярви и Сиеррамъярви увеличились на порядок по сравнению с фоновыми слоями (см. рис. 2).

Отмечено, что для Zn нет каких-либо закономерностей в вертикальном распределении концентраций в колонках ДО 8 озер. Ni, Cu, Pb, As и Cd имеют поверхностное обогащение и близко совпадают в каждой колонке. Обогащение Pb, As и Cd во всех колонках отмечено на бóльших глубинах, чем Ni и Cu.

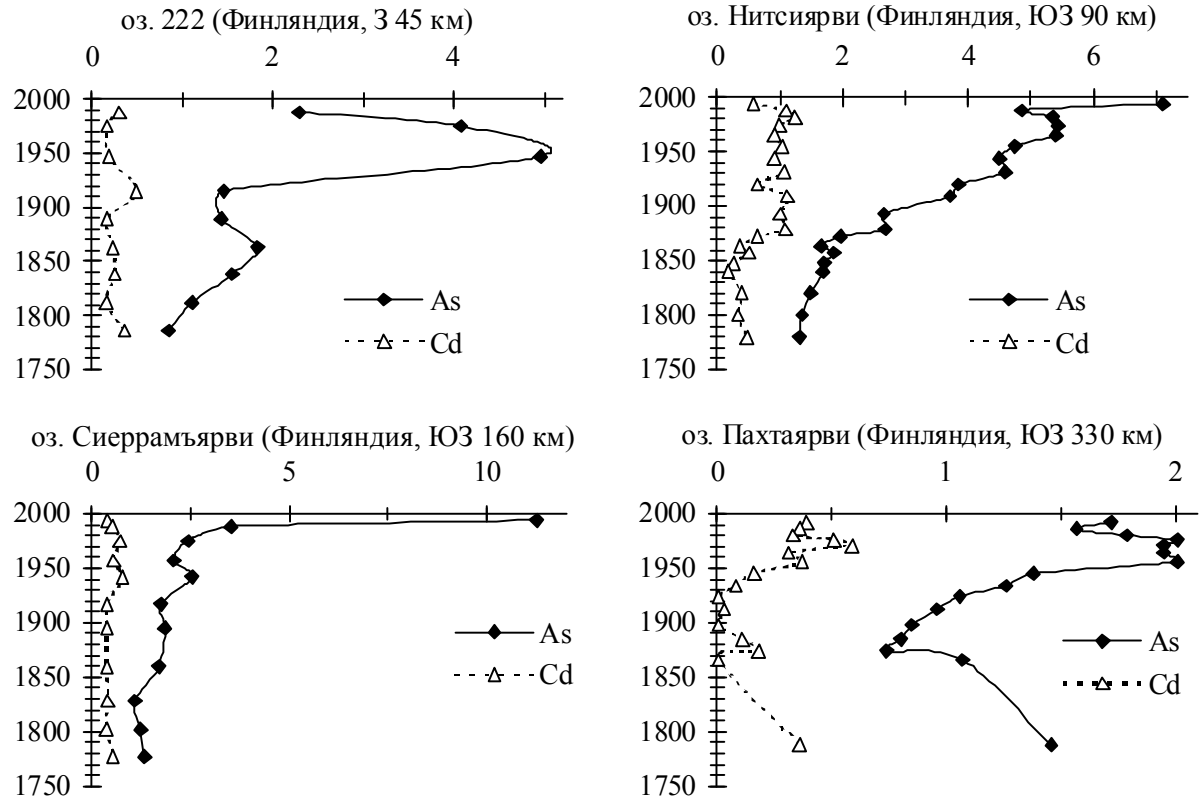



**Рис. 2.** Концентрации (мкг/г) As и Cd в датируемых ДО озер на различном удалении от комбината «Печенганикель»

**Fig. 2.** Concentrations (μg/g) of As and Cd in the dated sediments from lakes at different distances from the Pechenganickel smelter

**2.3. Территориальное распределение элементов в поверхностных донных отложениях водоемов.** Тяжелые металлы (ТМ) выбрасываются в атмосферу металлургическими предприятиями главным образом в нерастворимых формах. Вблизи источников осаждаются, прежде всего, наиболее крупные частицы, растворимость которых низка. По мере удаления от источника увеличивается

доля растворимых соединений металлов в атмосферных осадках [Крючков, Макарова, 1989]. На расстоянии более 150 км от медно-никелевых комбинатов фактически все ТМ, выпадающие из атмосферы, представлены в растворимой, наиболее токсичной форме.

Скорость аккумуляции металлов зависит не только от антропогенной нагрузки на водоем, но и от других факторов: глубины озера, pH и Eh воды, скорости осаждения, гранулометрического состава осадков, содержания органического материала в водоеме, концентрации окислов и гидроокислов Fe и Mn в ДО. Среди обследованных нами водоемов наиболее глубокие озера находились на территории Норвегии и Финляндии. Данные озера характеризовались низкой щелочностью и значениями pH от 5 до 7, в то время как российские озера были хорошо буферированы и имели значения pH, близкие к нейтральным (pH = 7). Наиболее глубокие озера (Норвегия) и более щелочные озера (Россия) характеризуются факторами, благоприятствующими аккумуляции металлов в ДО.

***Никель.*** Наиболее высокие концентрации Ni в поверхностном слое ДО озер отмечены на территориях, подверженных влиянию выбросов комбинатов «Печенганикель» и «Североникель». Средние концентрации здесь достигают 1791 и 2832 мкг/г, что в 36,6 и 51,6 раза больше средних фоновых значений в этих районах. Диапазон значений – от 38 до 7206. В районах, удаленных от комбината «Печенганикель» более чем на 20 км, средние концентрации резко снижаются до значений, близких к 100 мкг/г (примерно в 2–3 раза больше фоновых значений), а в норвежских озерах, несмотря на близкое расположение комбината, средняя концентрация понизилась до значения 64 мкг/г (в 2 раза больше фона), что связано с превалирующими юго-восточными румбами ветров. Средние концентрации Ni в озерах, удаленных на расстояние более чем 100 км от комбинатов, равны 27 мкг/г, и здесь не отмечено повышения концентраций Ni в поверхностных слоях ДО.

Концентрации Ni в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер резко снижаются по мере удаления от источников загрязнения, и на расстоянии более 40 км они, за очень редким исключением, не превышают 100 мкг/г (рис. 3). Озера, находящиеся к северо-востоку от комбината, значительно более загрязнены Ni, в то время как остальные озера имеют гораздо меньшие концентрации Ni.

Отмечена положительная корреляция содержания Ni в поверхностных ДО малых озер, находящихся на расстоянии до 50 км от комбината «Печенганикель», с концентрациями других элементов: Cu, Co, Cd и Hg. Это свидетельствует об одном источнике загрязнения. Положительная корреляция концентраций Ni с содержаниями Fe и Mn и отрицательная корреляция с содержаниями органического материала свидетельствуют о том, что процессы миграции Ni в ДО малых озер в зоне влияния выбросов металлургических комбинатов связаны с окислами и гидроокислами Fe и Mn.

Подсчитана регрессионная степенная зависимость между содержанием Ni в поверхностных слоях ДО малых озер и расстоянием от металлургических комбинатов:

$$C_{Ni} = 6059 \cdot L^{-1.209},$$

где $C_{Ni}$ – концентрация Ni, мкг/г сух. веса; L – расстояние от комбината, км. Критерий Фишера (F) равен 164, коэффициент степенной корреляции r = 0,793, т. е. формула достоверно описывает распределение концентраций Ni от источника загрязнения.

Отмечена следующая линейная зависимость между содержаниями Ni в воде исследуемых озер и концентрациями Ni в поверхностных слоях ДО:

$$Ni_{вод.} = 2{,}45 + 0{,}0375 \cdot Ni_{д.о.},$$

где $Ni_{вод.}$ – содержание Ni в воде озер (мкг/л), $Ni_{д.о.}$ – концентрации Ni в поверхностных слоях ДО (мкг/г сух. веса). Критерий Фишера (F) этой зависимости равен 433, коэффициент корреляции r = 0,920, уровень достоверности p = 0,0000, выборка n = 81, т. е. полученная зависимость достоверна.

Подобная картина распределения концентраций Ni в поверхностных ДО озер отмечена также вокруг крупнейших в мире медно-никелевых комбинатов – Норильского в Сибири [Blais et al., 1998] и Садбери в Канаде [Bradley, Morris, 1986] (рис. 4). Концентрации Ni в поверхностных ДО озер вокруг Норильского комбината резко снижаются с 2142 до 37 мкг/г, превышение над фоновыми содержаниями составляет от 0,71 до 22,6, причем последнее значение отмечено в озере в 17 км от комбината. Такое же снижение наблюдается и вокруг Садбери, где влияние выбросов медно-никелевого комбината на концентрации Ni и Cu в поверхностных ДО озер ограничивается 30–40 км, в то время как импактная зона вокруг Норильского комбината распространяется до 60 км. Пространственное распределение Ni и Cu имеет северо-восточный – юго-западный эллиптический характер с центром в Садбери. Аналогичный тренд для Ni и Cu отмечен для атмосферных

осадков и для гидрохимии озер, включая pH воды. Следовательно, распределение Ni и Cu в поверхностных ДО озер Мурманской области и Садбери полностью совпадает, так же, как и распределение этих элементов в атмосферных осадках и воде озер.

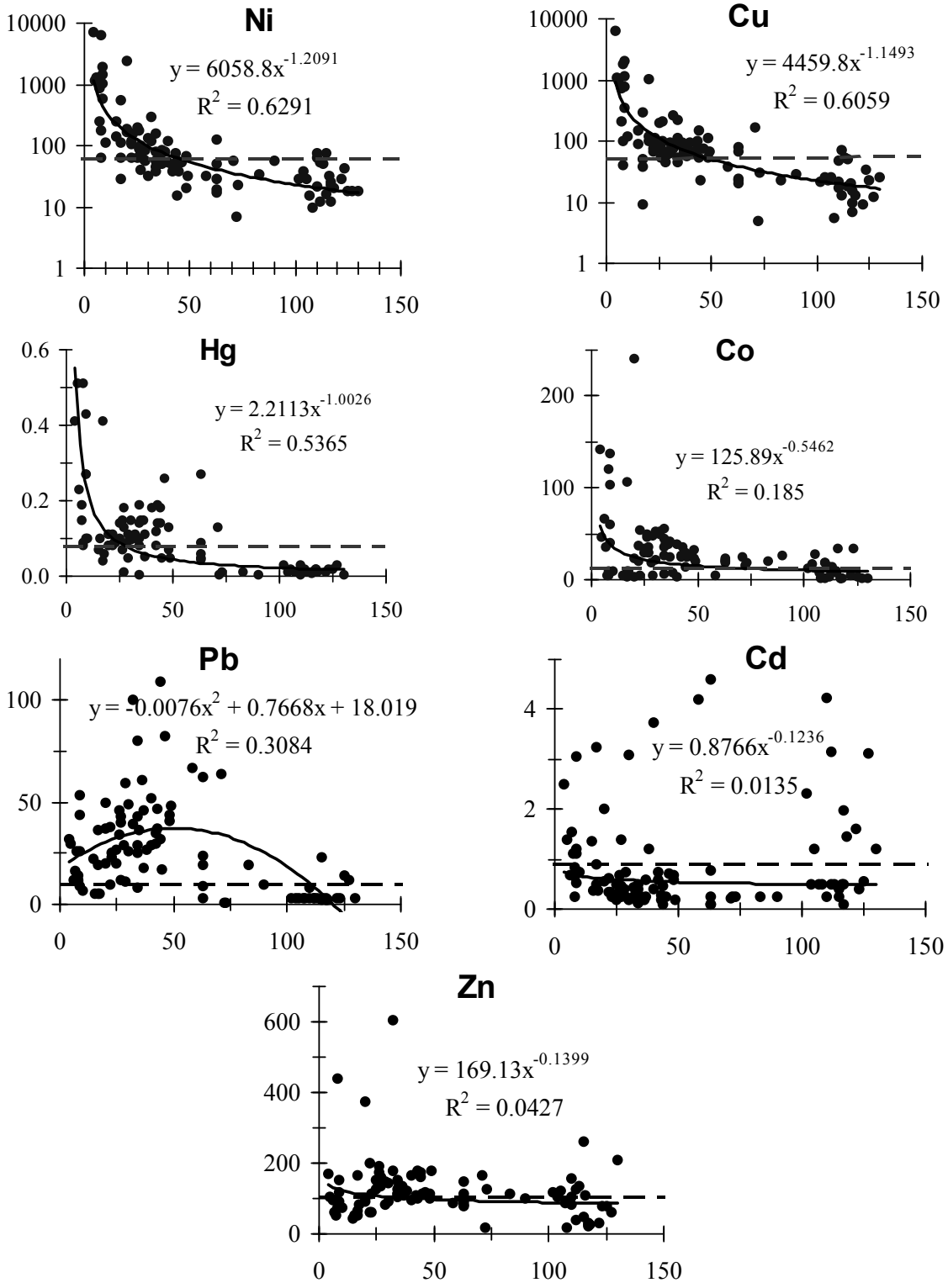



**Рис. 3.** Регрессионные зависимости концентраций металлов (мкг/г сухого веса) в поверхностных ДО (0–1 см) по мере удаления от металлургических комбинатов, км

**Fig. 3.** Regression correlations of metal concentrations (μg/g d.w.) in top-core sediments (0–1 cm) with distance from smelters, km

Регрессионная линия распределения концентраций Ni в ДО озер Мурманской области расположена более полого (см. рис. 4), чем вокруг Норильска и Садбери (которые почти совпадают), что связано в первую очередь с количеством выбросов Ni в атмосферу. Точных данных по выбросам $SO_2$, Ni и Cu металлургическими комбинатами не предоставляется, а в литературе приводятся очень противоречивые данные, отличающиеся более чем на порядок. Из рис. 4 видно, что выбросы комбинатов Норильска и Садбери на порядок больше, чем таковые в Мурманской области.

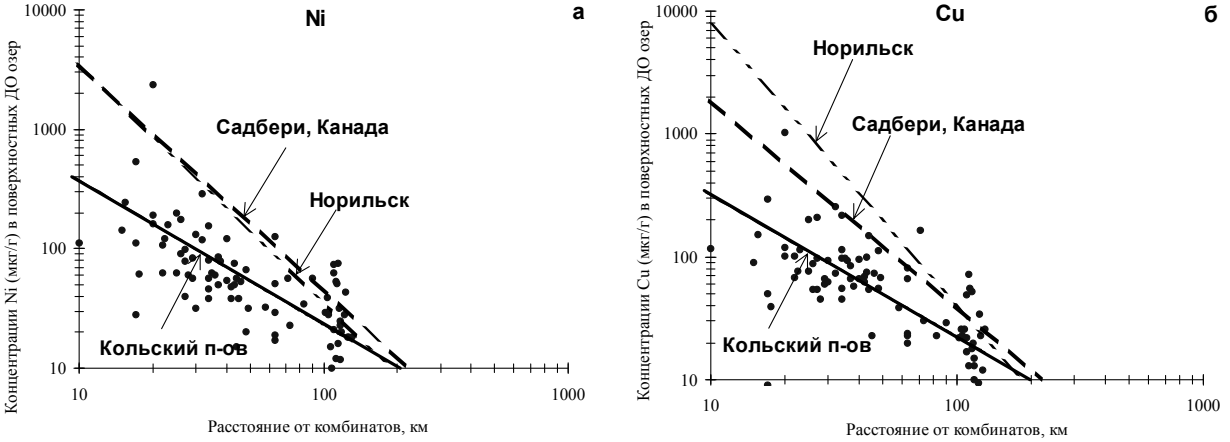



**Рис. 4.** Концентрации Ni (а) и Cu (б) в поверхностных ДО озер по мере удаления от медно-никелевых комбинатов Мурманской области, Норильска и Садбери

**Fig. 4.** Concentrations of Ni (a) and Cu (б) in top-core sediments with distance from copper and nickel smelters in the Murmansk Region, Norilsk, and Sudbery

***Медь.*** В распределении концентраций Cu в поверхностных ДО озер наблюдается закономерность, подобная распределению Ni (см. рис. 3). Наибольшими концентрациями обладают озера, находящиеся в непосредственной близости к комбинатам «Печенганикель» и «Североникель», в которых средние концентрации равны 1103 и 595 мкг/г, что в 19 и 14 раз превышает средние фоновые значения. По мере удаления от источников концентрации Cu, аналогично Ni, снижаются. Средние значения снижаются до значений 115 мкг/г (1,5 фонового значения) в норвежских озерах. На расстоянии более 50 км от источников загрязнения концентрации Cu в поверхностных ДО малых озер не превышают 100 мкг/г. Финляндские озера и озера водосбора р. Лотта имеют наименьшие средние концентрации – 28 и 26 мкг/г, что соответствует фоновым значениям.

Концентрации Cu в поверхностных ДО озер, находящихся на расстоянии до 50 км от комбината «Печенганикель», тесно коррелируют с содержаниями Ni, Co, Hg и Cd, что свидетельствует об одном источнике загрязнения.

Отмечена положительная корреляция концентраций Cu с содержаниями Fe и Mn и отрицательная – с содержаниями органического материала, это свидетельствует о том, что процессы миграции Cu, так же, как и Ni, в ДО малых озер в зоне влияния выбросов металлургических комбинатов связаны главным образом с окислами и гидроокислами Fe и Mn.

Регрессионная степенная зависимость между концентрациями Cu в поверхностных ДО малых озер и расстоянием от металлургических комбинатов имеет следующий вид:

$$C_{Cu} = 4460 \cdot L^{-1.149}.$$

Значение критерия Фишера равно 86, коэффициент степенной корреляции r = –0,778, что говорит о хорошем отражении распределения Cu в ДО малых озер в зависимости от расстояния от металлургических комбинатов.

Отмечена следующая линейная зависимость между содержаниями Cu в воде исследуемых озер и концентрациями Cu в поверхностных слоях ДО:

$$Cu_{вод.} = 4{,}81 + 0{,}00388 \cdot Cu_{д.о.},$$

где $Cu_{вод.}$ – содержание Cu в воде озер (мкг/л), $Cu_{д.о.}$ – концентрации Cu в поверхностных ДО (мкг/г сух. веса). Критерий Фишера (F) этой зависимости равен 20,2, коэффициент корреляции – r = 0,452, уровень достоверности p = 0,0000, выборка n = 81, т. е. полученная зависимость достоверна, но в меньшей степени, чем для Ni.

Подобная картина распределения концентраций Cu, так же, как и Ni, в поверхностных ДО озер отмечена также вокруг крупнейших в мире медно-никелевых комбинатов – Норильского в Сибири и Садбери в Канаде (см. рис. 4). Концентрации Cu в поверхностных ДО озер вокруг Норильского комбината находятся в диапазоне от 63 до 5400 мкг/г, снижаясь по мере удаления от плавилен; превышение над фоновыми значениями составляет от 1,04 до 28,4, наибольшие превышения отмечены вблизи комбината. Влияние выбросов медно-никелевого комбината на концентрации Cu в поверхностных ДО озер вокруг Садбери и Норильска ограничивается 30–40 и 60 км соответственно.

Регрессионная линия распределения концентраций Cu, так же, как и Ni, в ДО озер Мурманской области расположена более полого (см. рис. 4), чем вокруг Норильска и Садбери, что связано в первую очередь с количеством выбросов Cu в атмосферу. Вероятно, выбросы комбината Норильска на порядок больше, чем металлургических предприятий Мурманской области.

Никель и медь являются главными загрязнителями озер в пределах г. Мончегорска, расположенного вблизи медно-никелевого комбината «Североникель» [Slukovskii et al., 2020b]. Начиная с момента начала работы металлургического предприятия (в конце 1930-х гг.) отмечается существенный рост накопления Ni и Cu в ДО оз. Комсомольского со значений 78–79 мг/кг до 2140 и 2607 мг/кг соответственно (рис. 5). Кроме этих двух ТМ в изученных отложениях аналогичным образом ведут себя и другие загрязнители окружающей среды: Pb, Cd, Sb, Cr, Co, V и ряд литофильных элементов, например, редкоземельные металлы. Следует также добавить, что кроме непосредственных выбросов от металлургического производства, в геохимии современных ДО оз. Комсомольского отражается влияние ТЭЦ, работающей на мазутном топливе и обслуживающей металлургический комбинат и г. Мончегорск. Характерным маркером воздействия ТЭЦ на экосистему городского озера является поведение V и Ni.

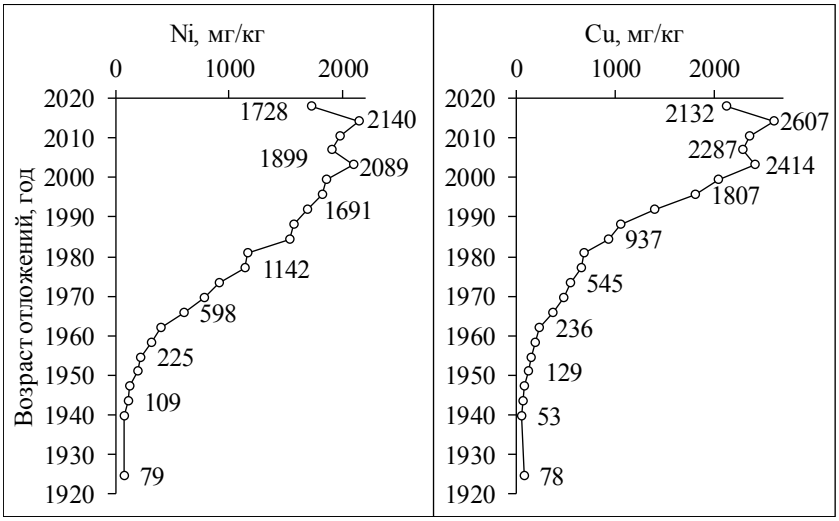



**Рис. 5.** Вертикальное распределение концентраций Ni и Cu в современных отложениях оз. Комсомольского (г. Мончегорск) относительно возраста озерных осадков

**Fig. 5.** Vertical distribution of Ni and Cu concentrations in modern sediments of Lake Komsomolskoe (Monchegorsk) relative to sediment age

Исследования отложений этого городского озера, расположенного в центре г. Мончегорска, показали также, что преимущественно ТМ в осадках связаны прочными соединениями (минеральная и органическая фазы). С органическим веществом отложений наибольшую связь имеют такие элементы, как Cu, Mo и Sb. Никель и медь также обнаружены в составе техногенных минеральных образований, которые попали в озеро и в ДО в результате выбросов металлургического производства. Чаще всего такие частицы представлены рудой или шлаком, а их размеры варьируют от 10 до 80 мкм (рис. 6). В основном это оксиды или сульфиды железа, никеля и реже меди. В качестве примесей в этих минеральных образованиях также могут встречаться Co, Mn, Pb и другие элементы.

***Кобальт.*** Содержание Co в поверхностных слоях ДО малых озер значительно ниже по сравнению с Ni и Cu (см. рис. 3). Наибольшие концентрации Co отмечены в озерах промышленных районов (среднее значение концентраций 72 мкг/г – 4 фоновых значения). Высокие концентрации наблюдаются также в норвежских озерах к северу от комбината «Печенганикель» (45 кг/г – около двух фоновых значений). В остальных районах средние значения концентраций Co снижаются до значений, близких к 10 мкг/г, т. е. в распределении Co вырисовывается та же картина, что и для Ni и Cu, но закономерность для Co выражена слабее (см. рис. 3).

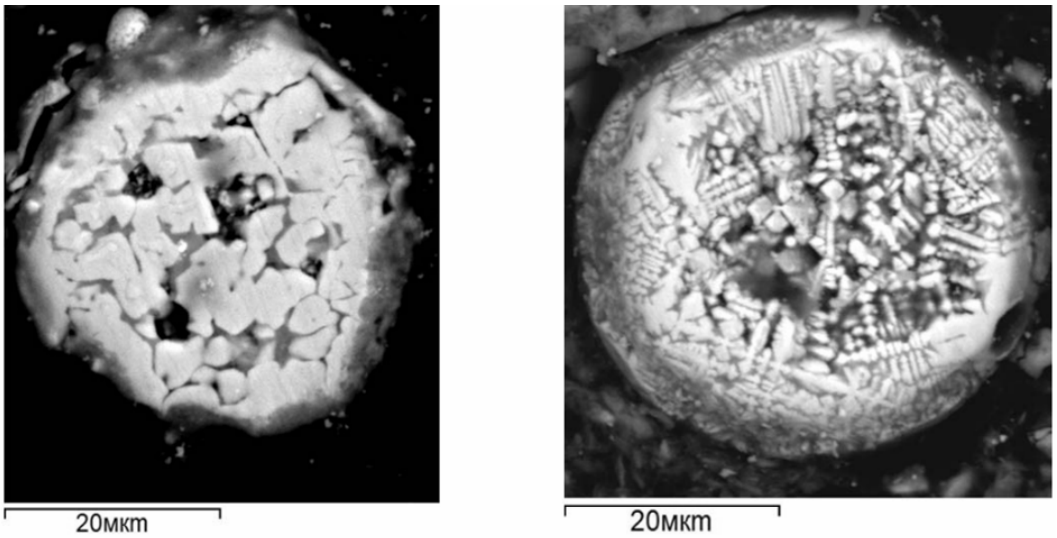



**Рис. 6.** Микроизображения техногенных частиц оксида Fe (слева) и оксида Ni (справа) из ДО оз. Комсомольского (г. Мончегорск) [Slukovskii et al., 2020b]

**Fig. 6.** Microimages of technogenic Fe oxide (left) and Ni oxide (right) particles from sediments of Lake Komsomolskoe (Monchegorsk) [Slukovskii et al., 2020b]

Содержание Co в поверхностных ДО озер имеет положительную корреляцию с концентрациями Ni, Cu, Cd и Hg. Отмечена положительная достоверная корреляция содержаний Co в поверхностных ДО малых озер в зоне влияния выбросов металлургических комбинатов с концентрациями Fe и Mn и отрицательная – с содержанием органического материала, что говорит в пользу того, что миграционные процессы Co в современных ДО малых озер в зоне влияния металлургических комбинатов связаны с окислами и гидроокислами Fe и Mn.

Регрессионная степенная зависимость концентраций Co в поверхностных слоях ДО малых озер от расстояния от металлургических комбинатов имеет следующий вид:

$$C_{Co} = 126 \cdot L^{-0.546}.$$

Значение критерия Фишера равно 19, коэффициент степенной корреляции r = –0,430, что говорит о хорошем отражении распределения Co в поверхностных ДО малых озер в зависимости от расстояния от металлургических комбинатов.

Достоверной зависимости между содержанием Co в воде исследуемых озер и концентрацией Co в поверхностных слоях ДО малых озер отмечено не было.

***Цинк.*** Наибольшее содержание Zn в поверхностных ДО отмечено в озере б/н около п. Лиинахамари, куда, вероятно, сбрасывались сточные воды поселка (1327 мкг/г – 8 фоновых значений). Средние концентрации Zn в озерах вблизи комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» составляют 195 и 164 мкг/г (1,5 фонового значения), в норвежских озерах – 126, в остальных районах не превышают 100 мкг/г, т. е. равны фоновым значениям.

Выявлена высокая корреляция с Pb (r = 0,649, n = 67, p < 0,000), что связано с близким по характеру поведением Zn и Pb в водных экосистемах. Так же, как и с Ni, Cu и Co, отмечена положительная достоверная корреляция содержания Zn в поверхностных слоях ДО малых озер с концентрациями Fe и Mn и отрицательная – с содержанием органического материала. Четкой закономерности в распределении Zn в зависимости от расстояния от комбинатов не отмечено (см. рис. 3).

***Кадмий.*** Концентрации Cd в ДО составляют от долей мкг/г до первых единиц мкг/г, а пределы определения ограничены 0,5 мкг/г, и средние концентрации подсчитаны только для достоверных значений. Поэтому установление закономерностей в распределении Cd затруднено, а отмечаются только повышенные, лабораторно устанавливаемые концентрации. Наблюдаются значительные концентрации Cd в ряде озер почти всех районов, что, вероятно, связано с геохимическими особенностями территорий водосборов озер (см. рис. 3).

Содержание Cd в поверхностных ДО малых озер имеет положительную линейную корреляцию с концентрациями Ni, Cu, Co и Hg. Отмечена положительная корреляция содержаний Cd

в поверхностных ДО малых озер с концентрациями Fe и Mn и с содержанием органического материала, это говорит в пользу того, что миграционные процессы Cd, как и Ni, Cu и Co, в современных ДО озер в зоне влияния металлургических комбинатов связаны с окислами и гидроокислами Fe и Mn и органическим материалом. В распределении Cd в поверхностных ДО малых озер достоверной закономерности выявлено не было (см. рис. 3).

***Свинец.*** Появление Pb в ДО является результатом его поступления с территории водосборного бассейна, где существуют геологические источники его происхождения, а также в результате атмосферного выпадения. В последнем случае доминируют: 1) металлургическая промышленность, 2) сжигание угля и 3) потребление бензина с тетраэтилсвинцом. Металлургическая промышленность является основным источником загрязнения Pb с 1850-х гг. на западе США, и влияние этого источника фиксируется также и в Европе. Массовое потребление угля началось позднее и достигло значительных масштабов в США примерно в 1920-х гг., и оно растет до настоящего времени. Первые два источника атмосферного Pb были дополнены потреблением в качестве автомобильного топлива этилированного бензина, который интенсивно используется с 1940-х гг. и с того же времени стал доминировать в атмосферных выбросах Pb. Максимальное его потребление отмечено в 1960-е гг.

В региональном распределении Pb отмечена отличная от всех ТМ картина – увеличение концентраций с востока на запад. Наибольшие значения концентраций Pb отмечены на норвежской территории, где среднее содержание равно 40 мкг/г, что составляет около 10 фоновых значений. В промышленных районах происходит уменьшение концентраций (среднее содержание 28 мкг/г, или 4 фоновых значения). Концентрации Pb в поверхностных ДО коррелируют с содержаниями Zn, о чем было сказано выше.

Достоверной корреляции концентраций Pb с содержаниями Fe и Mn и органического материала в поверхностных слоях ДО малых озер в зоне влияния металлургических комбинатов не отмечено.

Отмечена регрессионная полиномная зависимость между содержанием Pb и расстоянием от металлургических комбинатов (см. рис. 3), в которой значение критерия Фишера (F) равно 26, коэффициент степенной корреляции r = –0,55, т. е. Pb имеет отличную от всех, за исключением Cd, ТМ картину – увеличение содержания по мере удаления от комбината «Печенганикель», что связано, вероятно, с более интенсивным использованием автомобильного транспорта в северных районах Норвегии и Финляндии, чем в Мурманской области.

Максимальное значение на полиномной кривой соответствует 50 км, т. е. как раз на территории Норвегии. Свинец даже в большей степени, чем Cd, может рассматриваться как глобальный загрязнитель, что отмечено в исследованиях ДО озер западных стран.

Недавние исследования [Slukovskii et al., 2020a, b] поведения Pb в городских озерах Мурманской области (города Мурманск, Мончегорск, Кировск) показали, что тенденции к существенному росту концентраций этого ТМ в современных отложениях отмечены с начала или середины XX в. (рис. 7). В части озер в верхних слоях концентрации Pb снижаются, что связано с отказом от этилированного бензина. Однако в озерах Окуневое (г. Мурманск) и Комсомольское (г. Мончегорск) отмечен рост содержания Pb до самых современных слоев изученных ДО. Это может быть вызвано процессом ежегодного сноса материала из загрязненного почвенного покрова в городские озера или иными источниками загрязнения окружающей среды данным ТМ.

На рис. 7 видно: наибольшим уровнем накопления Pb характеризуются отложения озер г. Мурманска, крупнейшего города Мурманской области. Следует отметить, что в мурманские озера Pb мог попадать не только из-за работы автомобильного транспорта или выбросов промышленных предприятий, но и в связи с негативным влиянием угольного терминала в порту города. Известно, что Pb может в качестве примеси входить в состав топочных углей.

***Ртуть.*** Атмосферные выбросы металлургических комбинатов «Печенганикель» и «Североникель» являются источником повышенных концентраций Hg, наблюдаемых в поверхностных ДО малых озер (см. рис. 3). Выбросы кислотообразующих веществ комбинатами – это фактор, способный увеличить общее поступление Hg с территории водосборов. Выбросы Hg, вызванные плавлением богатой серой руды, доставляемой из г. Норильска, могут также увеличивать концентрации Hg в поверхностных ДО. Существует незначительное увеличение концентраций Hg и на норвежской территории, что отражает общее увеличение антропогенных выбросов Hg в атмосферу в Норвегии.

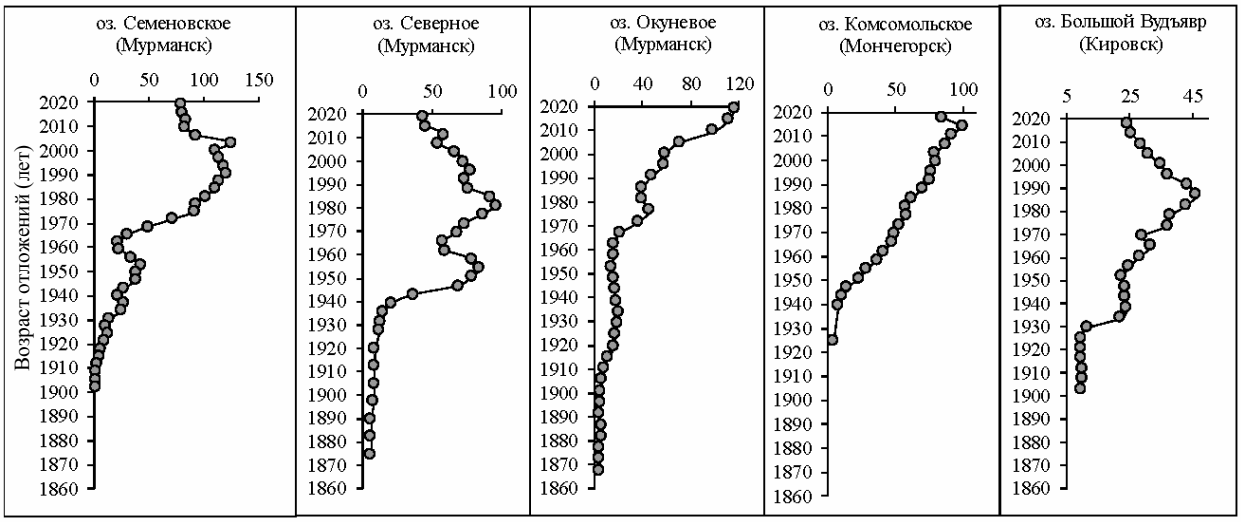



**Рис. 7.** Вертикальное распределение концентраций Pb (мг/мг) в современных отложениях городских озер Мурманской области

**Fig. 7.** Vertical distribution of Pb concentrations (mg/mg) in modern sediments of urban lakes in the Murmansk Region

Выявлено явное уменьшение концентраций Hg в атмосфере северных районов Скандинавии. Отмечено резкое уменьшение (в 4–5 раз) концентраций Hg в поверхностных слоях ДО озер по мере удаления от комбината «Печенганикель», на расстоянии 50 км в среднем значения составляют 0,12 мкг/г, что равно фоновому значению.

Концентрации Hg в поверхностных ДО малых озер имеют положительную корреляцию с содержаниями Ni, Cu, Co и Cd. Отмечена положительная достоверная корреляция содержаний Hg в поверхностных ДО малых озер с концентрациями Fe и Mn и отрицательная – с содержанием органического материала, что говорит в пользу того, что миграционные процессы Hg, как и Ni, Cu, Co и Cd, в современных ДО озер в зоне влияния металлургических комбинатов связаны с окислами и гидроокислами Fe и Mn.

Регрессионная степенная зависимость концентраций Hg от расстояния в зоне влияния комбината «Печенганикель» имеет следующий вид:

$$C_{Hg} = 2{,}21 \cdot L^{-1.003}.$$

Значение критерия Фишера (F) равно 124, коэффициент степенной корреляции r = –0,732, т. е. полученная зависимость удовлетворительно описывает закономерность распределения концентраций Hg.

**2.4. Оценка экологического состояния поверхностных вод по результатам исследования химического состава донных отложений водоемов.** Довольно много работ в отечественной научной литературе посвящено описанию загрязнения пресноводных экосистем. В предшествующих параграфах были приведены доказательства применимости ДО для оценки загрязнения поверхностных вод. Загрязняющие вещества, попадающие на территорию их водосборов, четко фиксируются в ДО, поэтому ДО могут служить информативным показателем как современного состояния пресноводной экосистемы, так и ее состояния в прошлые годы. В российской научной литературе отсутствуют интегральные показатели, описывающие комплексное загрязнение ДО и определяющие потенциальную экологическую опасность для гидробионтов, создаваемую загрязняющими веществами, находящимися в водной системе в различных формах.

Подход фоновых значений основан на сравнении природных (фоновых) или незначительно повышенных концентраций с содержаниями в поверхностных слоях ДО. Особенно полезными являются образцы из наиболее глубоких слоев ДО в данном озере или станции большого озера. Тем не менее необходима стандартизация распределения гранулометрического состава или отбор образцов с подобным гранулометрическим составом, например с тонкодисперсным илом.

Интенсивность загрязнения водных объектов может быть оценена с помощью определения содержания загрязняющих веществ в поверхностных ДО. Методика определения степени загрязнения водных экосистем специальными индексами описана [Håkanson, 1980, 1984] – коэффициент ($C_f$ ) и степень ($C_d$) загрязнения; [Tolonen, Jaakkola, 1983] – коэффициент антропогенного обогащения (CEF); [Ouellet, Jones, 1983; Alhonen, 1986] – коэффициент антропогенного обогащения ДО (SAEF); [Müller, 1979] – индекс геоаккумуляции ($I_{geo}$); [Сает и др., 1990] – суммарный показатель загрязнения (ZC). Все эти индексы в основном определяются как отношение концентраций определенного элемента или соединения в поверхностном (чаще всего 1-см) слое к концентрации в самом глубоком слое (обычно более 20–30 см) колонки ДО определенного озера.

В Германии первый количественный индекс загрязнения металлами был предложен [Müller, 1979], который назвал его «*индексом геоаккумуляции*» ($I_{geo}$), т. е. обогащение геологического субстрата:

$$I_{geo} = \log_2 Cn/1{,}5 \cdot Bn.$$

При определении $I_{geo}$ берутся в расчет концентрации элементов в тонкозернистой фракции ДО ($C_n$) и геохимические фоновые значения ($B_n$) в глинистых или иловых ДО. Индекс геоаккумуляции подразделяется на 7 степеней, из которых наивысшая степень (6) отражает более чем 100-кратное превышение над фоновыми значениями.

Для оценки степени загрязнения ДО Ю. Е. Саетом с соавторами [1990] разработан суммарный показатель загрязнения ZC, представляющий собой аддитивную сумму превышений коэффициентов концентраций над фоновым уровнем:

$$Z_C = \Sigma K_C^n{}_i - (n - 1),$$

где $K_C$ – коэффициент концентрации (отношение содержания химического элемента в оцениваемом объекте к его фоновому содержанию), n – число химических элементов.

**Коэффициент и степень загрязнения.** Для оценки загрязнения малых и больших озер Мурманской области и Севера Фенноскандии была выбрана методика [Håkanson, 1980], описание которой приводится ниже. Для описания загрязнения токсичными веществами определялись значения коэффициента загрязнения ($C_f^i$):

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

где $C_{0\text{-}1}{}^i$ – содержание вещества (i – металлы: Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, Hg, As) 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 для ДО плюс одно стандартное отклонение (табл. 1).

В табл. 2 приведена ориентировочная шкала оценки загрязнения водных систем по величине ZC в ДО.

**Таблица 2.** Ориентировочная шкала оценки загрязнения водных систем [Сает и др., 1990]

**Table 2.** Indicative scale for assessment of water system pollution [Saiet al et., 1990]

| Уровень загрязнения | ZC токсичных элементов в ДО | Содержание токсичных элементов в воде |
|---|---|---|
| Слабый | Менее 10 | Слабо повышенные относительно фона |
| Средний | 10–30 | Повышенные относительно фона; эпизодическое превышение ПДК |
| Сильный | 30–100 | Во много раз выше фона; стабильное превышение отдельными элементами уровней ПДК |
| Очень сильный | Более 100 | Практически постоянное присутствие многих элементов в концентрациях выше ПДК |

Коэффициент загрязнения ($C_f^i$) подсчитывается для каждого отдельного загрязняющего вещества или соединения. Если $C_{0\text{-}1}{}^i > C_n{}^i$, мы можем определить это вещество как загрязняющее или обогащенное.

В этом подходе придерживались следующей классификации значений коэффициента загрязнения: $C_f^i < 1$ – низкий (свидетельствует о низком загрязнении ДО изучаемым элементом); $1 \le C_f^i < 3$ – умеренный; $3 \le C_f^i < 6$ – значительный; $C_f^i \ge 6$ – высокий.

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

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

Данный подход позволил определить коэффициент загрязнения ($C_f^i$), который характеризует загрязнение данной акватории как отдельными веществами, так и их суммарным вкладом на основе установления степени загрязнения $C_d$, которое определяет общее загрязнение исследуемыми веществами бассейна.

Аналогично при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались классификации значений $C_d$, предложенной [Håkanson, 1980], из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по *n* веществам: $C_d < n$ – низкая; $n \le C_d < 2n$ – умеренная; $2n \le C_d < 4n$ – значительная; $C_d \ge 4n$ – высокая, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Выбор терминологии и ограничения между различными классами могут быть предметом для дальнейшего усовершенствования. Для характеристики экологического состояния озер Фенноскандии данный подход наиболее приемлем и позволяет представить характер загрязнения адекватным и стандартным для всех исследованных станций способом на основе коэффициента и степени загрязнения.

Значения степени загрязнения ($C_d$) для малых озер Мурманской области рассчитывались по 7 элементам – Ni, Cu, Zn, Co, Cd, Pb, Hg, поэтому для описания степени загрязнения использовалась следующая классификация значений $C_d$: $C_d < 7$ – низкая; $7 \le C_d < 14$ – умеренная; $14 \le C_d < 28$ – значительная; $C_d \ge 28$ – высокая.

Высокие средние значения $C_d$ имеют озера индустриальных районов – 61,7 и 52,1 для территорий влияния комбинатов «Печенганикель» и «Североникель» соответственно, причем наибольший вклад в эти высокие значения имеют коэффициенты загрязнения по Ni ($C_f^{Ni}$ = 47,0 и 29,9 соответственно) и по Cu ($C_f^{Cu}$ = 13,0 и 7,0 соответственно). Остальные металлы в этих районах имеют умеренные средние значения $C_f$. Озера к востоку и северо-востоку от комбината «Печенганикель» и норвежские озера имеют умеренные средние значения $C_d$ (8,3, 8,0 и 8,7 соответственно), и наибольший вклад в эти значения вносит Pb ($C_f^{Pb}$ = 2,4, 2,7 и 2,7 соответственно). На территории к югу от комбината «Печенганикель» наблюдается среднее значение $C_d$, находящееся на границе между низким и умеренным (7,5). Умеренные значения $C_f$ имеют только Ni, Pb и Cd (1,6, 1,3 и 1,2 соответственно). Низкие средние значения $C_d$ имеют озера водосбора р. Лотта и финляндские озера (3,6 и 5,0 соответственно). Наибольший вклад в эти значения вносят Cd ($C_f^{Cd}$ = 1,7) и Pb ($C_f^{Pb}$ = 2,0), соответственно в озерах водосбора р. Лотта и финляндских озерах. Остальные металлы в этих районах имеют низкие средние значения $C_f$.

Распределение значений $C_d$ малых озер территории Мурманской области показано на рис. 8. Очень высокие значения $C_d$ отмечены на расстоянии до 10 км от источников загрязнения, значительные – до 15 км, а умеренные – до 40 км, причем озера, расположенные по превалирующему направлению господствующих ветров (к северо-западу от комбинатов), имеют большие значения $C_d$ (см. рис. 8). Можно сделать вывод: деятельность металлургических комбинатов оказывает негативное влияние на пресноводные экосистемы на расстоянии до 40 км, что хорошо согласуется с содержаниями ТМ в поверхностных водах Мурманской области [Моисеенко и др., 1996].

Значения $C_d$ в зоне влияния металлургических комбинатов имеют тесную положительную корреляционную связь с концентрациями Ni, Cu, Co и Hg в поверхностных ДО озер ($r = 0{,}60–0{,}98$, $n = 67$, $p < 0{,}0001$), что говорит об одном и том же источнике загрязнения и о том, что эти металлы являются основными загрязнителями в этом регионе и показывают отрицательную корреляцию с содержанием органического материала. Регрессионная степенная зависимость значений $C_d$ от расстояния от металлургических комбинатов имеет следующий вид:

$$C_d = 140 \cdot L^{-0.849},$$

где значение критерия Фишера (F) равно 79, коэффициент степенной корреляции равен $r = –0{,}75$, т. е. полученная зависимость хорошо отражает закономерность распределения значений $C_d$.

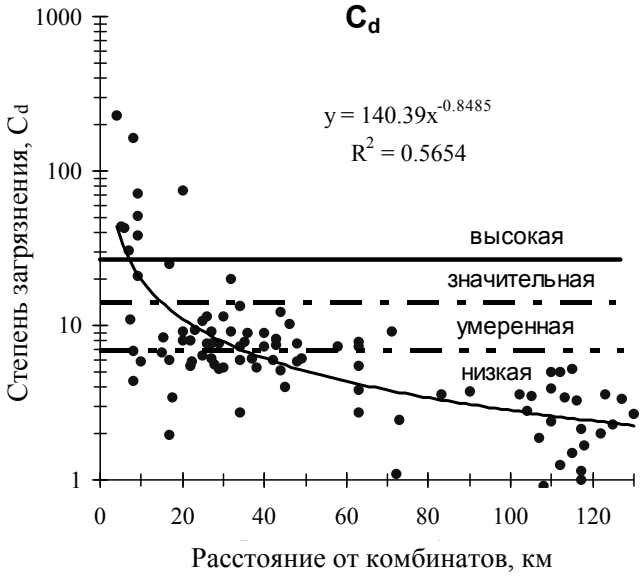



**Рис. 8.** Распределение значений степени загрязнения ($C_d$) малых озер Мурманской области в зависимости от удаленности от металлургических комбинатов

**Fig. 8.** Murmansk Region small lake pollution degree ($C_d$) distribution with distance from smelters

В последние годы в международной научной литературе при изучении ДО озер всё больше используется **индекс антропогенной нагрузки PLI (Pollution Load Index)**, который рассчитывается по формуле:

$$PLI = (CF_1 \cdot CF_2 \cdot \ldots \ CF_n)^{1/n},$$

где CF – коэффициент концентрации, n – число металлов, взятых для расчета индекса [Tomlinson et al., 1980].

В зависимости от величины индекса PLI уровень загрязнения может быть оценен как низкий ($PLI \leq 1$), умеренный ($1 < PLI \leq 2$), высокий ($2 < PLI \leq 3$) и экстремально высокий ($PLI > 3$). Индекс PLI наиболее распространен в англоязычной научной литературе, поэтому при публикации статей в международных журналах предпочтительнее использовать индекс PLI, чем $Z_c$, который используется в основном исследователями из России и стран бывшего СССР.

Исследование городских озер Мурманска [Slukovskii et al., 2020a] показало, что по величине индекса PLI можно сказать: изученные водные объекты относятся к озерам с высоким и экстремально высоким уровнем загрязнения. Наиболее сложная ситуация наблюдается в ДО озер Семеновское и Ледовое, расположенных вблизи оживленных автомобильных трасс, станций технического обслуживания и заправочных станций.

**Заключение.** ДО водоемов являются важным источником информации о геохимических и экологических условиях, существовавших на водосборе и в самом водоеме, позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной среды. Формирование химического ДО водоемов происходит в результате разнообразных процессов: климатических, гидрологических, механических, физических, химических, биологических и других, протекающих во времени как на водосборной площади, так и в самом озере. Самые глубокие слои в колонках ДО (обычно между 20 и 30 см) отражают фоновые содержания элементов и соединений, так как эти слои образовались более 200 лет тому назад, т. е. до начала освоения северных регионов. Средние фоновые доиндустриальные значения ($C_n^i$) для каждого элемента определялись как среднее значение плюс одно (1) стандартное отклонение. Фоновые концентрации ТМ в различных районах довольно непостоянны по всем исследуемым объектам, что отражает значительные вариации в геохимии коренных пород и в условиях осадконакопления в целом. Средние значения фоновых содержаний ($C_n^i$) для Ni, Cu, Co, Zn в ДО малых озер севера Фенноскандии подобны последним в Северной Америке и Скандинавии. Установленные фоновые значения элементов и соединений являются основой для определения уровня современного антропогенного загрязнения пресноводных экосистем.

Средние скорости осадконакопления в озерах северной Фенноскандии за последние полтора столетия довольно постоянны и находятся в пределах 0,3–0,6 мм/год. Исключение составляют два финляндских озера, в которых эти значения в среднем составляют 1,0–1,25 мм/год. Увеличение концентраций Ni и Cu в ДО озер северной Фенноскандии датируется 30–40-ми годами прошлого века и связано с началом горно-металлургической деятельности на территории Северной Норвегии

и Мурманской области. С увеличением расстояния от источников загрязнения уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО и снижается разброс содержаний в целом по колонке. Значительное увеличение концентраций Pb датируется концом XIX – началом XX в. С увеличением расстояния от источников загрязнения Pb становится одним из основных загрязнителей. Особенно это характерно для финляндских озер. Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат As и Cd. Начало загрязнения этими элементами датируется серединой XIX в. Это загрязнение связано с развитием промышленности в Европе и России и воздушным трансграничным переносом загрязняющих веществ в высокие широты. Освоение северных территорий и дальнейшее развитие промышленности в Европе сказалось в следующем увеличении концентраций As и Cd в начале текущего столетия. Резкое повышение концентраций As (на порядок по сравнению с фоновыми слоями) и Cd в середине XX в. связано с развитием промышленности в послевоенные годы.

Выявлено, что ареалы высоких значений концентраций тесно коррелируемых элементов Ni, Cu, Co и Hg в поверхностных ДО малых озер Мурманской области совпадают и ограничиваются 40 км локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Увеличение содержаний Pb прослеживается с востока на запад, что отражает общий поток переноса загрязняющих веществ из центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb, Cd также является глобальным загрязнителем.

Для оценки загрязнения пресноводных экосистем использовалась методика определения индекса экологической опасности, предложенная [Håkanson, 1980] и адаптированная для условий Европейского Севера. Коэффициент загрязнения ($C_f^i$) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента или соединения в поверхностном сантиметровом слое к доиндустриальному фоновому значению. Степень загрязнения ($C_d$) определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязнений. Очень высокие значения $C_d$ отмечены в малых озерах территории Мурманской области на расстоянии до 10 км от источников загрязнения, значительные значения – до 15 км, а умеренные – до 40 км, причем озера, расположенные по превалирующему направлению господствующих ветров (к северо-западу от комбинатов), имеют бóльшие значения $C_d$.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какая методика отбора проб ДО применяется для изучения геохимии и экологического состояния озер Мурманской области?
2. Какие закономерности отмечаются в вертикальном и территориальном распределении тяжелых металлов в ДО озер Мурманской области?
3. Какая в среднем скорость осадконакопления для ДО озер Мурманской области?
4. Какие тяжелые металлы являются приоритетными загрязняющими веществами для ДО озер Мурманской области?
5. Какие показатели используются для оценки экологического состояния водоемов Мурманской области по результатам исследований химического состава ДО?

## Литература

*Виноградов А. П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

*Даувальтер В. А.* Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 1999. 52 с.

*Даувальтер В. А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с.

*Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б.* Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 62–75.

*Крючков В. В., Макарова Т. Д.* Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1989. 96 с.

Методы экологических исследований водоемов Арктики / С. С. Сандимиров [и др.]. Мурманск: МГТУ, 2019. 180 с.

*Моисеенко Т. И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ, 1997. 261 с.

*Моисеенко Т. И., Родюшкин И. В., Даувальтер В. А., Кудрявцева Л. П.* Формирование качества поверхностных вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водосборы арктического бассейна. Апатиты: КНЦ, 1996. 264 с.

*Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

*Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б.* Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 111 с.

*Alhonen P.* Heavy metal load of Lake Iidesjarvi as reflected in its sediments // Aqua Fenn. 1986. Vol. 16, N 1. P. 11–16.

*Blais J. M., Duff K. E., Laing T. E., Smol J. P.* Regional contamination in lakes from the Noril'sk region in Siberia, Russia // Water, Air, Soil Pollut. 1998. Vol. 95. P. 1–16.

*Bradley R. W., Morris J. R.* Heavy metals in fish from a series of metal-contaminated lakes near Sudbery, Ontario // Water, Air, Soil Pollut. 1986. Vol. 27. P. 341–357.

*Förstner U.* Metals concentrations in recent lacustrine sediments // Arch. Hydrobiol. 1977. Vol. 80. P. 172–191.

*Håkanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

*Håkanson L.* Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects // Water Resour. Resear. 1984. Vol. 20, N 1. P. 41–46.

*Müller G.* Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. – Veränderungen seit 1971 // Umschau in Wissenschaft and Technik. 1979. Vol. 79. S. 778–783.

*Ouellet M., Jones H. G.* Historical changes in acid precipitation and heavy metals deposition origination from fossil fuel combustion in Eastern North America as revealed by lake sediment geochemistry // Water, Air, Soil Pollut. 1983. Vol. 15. P. 115–130.

*Slukovskii Z. I.* Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia // Вестник МГТУ. 2020. 23(1), 80–92.

*Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Siroezhko E. V., Cherepanov A. A.* Geochemistry features of sediments of small urban arctic Lake Komsomolskoye, Murmansk region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020b, c. Vol. 467. N 012004. doi: 10.1088/1755-1315/467/1/012004.

*Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E.* The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia // Water. 2020a. 12.

*Tolonen K., Jaakkola T.* History of lake acidification and air pollution studied on sediments in South Finland // Ann. Bot. Fennici. 1983. Vol. 20. P. 57–78.

*Tomlinson D., Wilson J., Harris C., Jeffrey D.* Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index // Helgoländer. Meeresun. 1980. 33. 566–575.

*Turekian K. K., Wedephol K. H.* Distribution of the elements in some major units of the earth's crust // Bull. Geol. Soc. Am. 1961. Vol. 32. P. 175–192.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Даувальтер Владимир Андреевич**
главный научный сотрудник,
профессор, д.г.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: v.dauvalter@ksc.ru

**Слуковский Захар Иванович**
старший научный сотрудник, к.б.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
Институт геологии КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: slukovsky87@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

**Dauvalter, Vladimir**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: v.dauvalter@ksc.ru

**Slukovskii, Zakhar**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
Institute of Geology,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: slukovsky87@gmail.com

УДК 574.5

# ЭВТРОФИРОВАНИЕ ВОДОЕМОВ – ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

**Г. Т. Фрумин**

*Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В обобщенном виде представлены результаты отечественных и зарубежных исследований процесса эвтрофирования водоемов. Приведены основные источники экспорта биогенных элементов в водные объекты с водосборных территорий. Рассмотрены токсины, выделяемые сине-зелеными водорослями, и их действие на живые организмы. Приведены формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов. Рассчитаны допустимые фосфорные нагрузки на некоторые озера, расположенные в различных природно-климатических зонах.

**Ключевые слова:** биогенные элементы; сине-зеленые водоросли; водные объекты; трофический статус; фосфорная нагрузка.

## WATER EUTROPHICATION – A GLOBAL ENVIRONMENTAL PROBLEM

**G. T. Frumin**

*Herzen State Pedagogical University of Russia St. Petersburg, Russia*

**Summary.** The results of Russian and foreign studies of the process of water eutrophication are presented in a nutshell. The main sources of nutrient input from catchment areas are discussed. The toxins produced by cyanobacteria and their effects on organisms are considered. Formulas are given for calculating the probabilities of the trophic status of water bodies . The permissible phosphorus loads on some lakes located in different natural and climatic zones have been calculated.

**Keywords:** nutrients; cyanobacteria; water bodies; trophic status; phosphorus load.

**Тема.** «Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема».

**Цель.** Расширить кругозор слушателей на основе интеграции знаний об эвтрофировании водных объектов.

**Задачи.** Формирование основы для дальнейшего самостоятельного изучения проблемы эвтрофирования. Формирование познавательного интереса к содержанию учебного предмета и профессиональной мотивации будущего специалиста. Формирование новых знаний, еще не получивших освещения в учебных пособиях.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Стадии процесса эвтрофирования.
2. Сине-зеленые водоросли и токсины.
3. Основные источники биогенной нагрузки на водоемы.
4. Индексы трофического статуса.
5. Вероятностная оценка трофического статуса.
6. Допустимые фосфорные нагрузки.

Выводы.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** Подготовлены презентации «Антропогенное эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема», «Методы расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера».

## Изложение материала

**Введение.** Международный лимнологический комитет обосновал шесть следующих проблем озероведения: эвтрофирование, флуктуации уровня воды, заиливание, токсикофикация (загрязнение токсичными соединениями), ацидофикация (подкисление воды), разрушение озерных экосистем.

Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема эвтрофирования (синонимы: эвтрофикация, евтрофирование, евтрофикация). Согласно ГОСТ 17.1.1.01-77, «эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». Международная организация по стандартизации предлагает иное определение – обогащение воды биогенными веществами, особенно азота и фосфора, что ускоряет рост водорослей и высших форм растительной жизни.

Среди множества биогенных элементов, влияющих на процесс эвтрофирования (азот, кислород, углерод, сера, кальций, калий, хлор, железо, марганец, кремний и др.), для водоемов умеренной зоны решающую роль играет фосфор. Для морских акваторий – фосфор или азот или их сочетание.

**1. Стадии процесса эвтрофирования.** Эвтрофирование представляет собой естественный процесс эволюции водоема. С момента «рождения» водоем в естественных условиях проходит несколько стадий в своем развитии: на ранних стадиях – от ультраолиготрофного до олиготрофного, далее становится мезотрофным и в конце концов водоем превращается в эвтрофный и гиперэвтрофный – происходит «старение» и гибель водоема с образованием болота. Однако под воздействием хозяйственной деятельности этот естественный процесс приобретает специфические черты, становится антропогенным. Резко возрастают скорость и интенсивность повышения продуктивности экосистем. Так, если в естественных условиях эвтрофирование какого-либо озера протекает за 1000 лет и более, то в результате антропогенного воздействия это может произойти в сто и даже тысячу раз быстрее. Такие крупные водоемы, как Балтийское море, озера Эри, Тахо и Ладожское, перешли из одного трофического состояния в другое всего за 20–25 лет. Данный процесс охватил многие крупнейшие пресноводные озера Европы, США (Великие Американские озера), Канады и Японии.

По образному выражению Ю. Одума, антропогенное эвтрофирование есть «злокачественное увеличение первичной продукции в водоеме». Развитие процесса антропогенного эвтрофирования приводит ко многим неблагоприятным последствиям с точки зрения водопользования и водопотребления (развитие «цветения» и ухудшение качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб) [Батян и др., 2009].

Типичная причина эвтрофирования водоемов – увеличение биогенной нагрузки, а типичное последствие – бурное «цветение» цианобактерий с последующим отмиранием их избыточной биомассы, выделением токсинов, нарушением кислородного режима, проявлениями гниения и т. д.

**2. Сине-зеленые водоросли и токсины.** Сине-зеленые водоросли, образующиеся в процессе эвтрофирования, в результате своей жизнедеятельности производят сильнейшие токсины (алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др.), которые сами не используют, но они, попадая в водную толщу, представляют опасность для живых организмов и человека. Токсины могут вызывать цирроз печени, дерматиты у людей, отравление и гибель животных.

Токсины водорослей являются первопричиной загадочной гаффской болезни, эпидемии которой начиная с 1924 г. несколько раз наблюдались в окрестностях города Кенигсберга (ныне Калининград), на побережье опресненного залива Балтийского моря Фришес-Гафф. Болезнь поражала рыбаков, занимавшихся промыслом в заливе, и не распространялась на выезжавших на лов

в Балтийское море. Гаффская болезнь наступает внезапно, без продромальных симптомов, и выражается в острых мышечных болях при малейших движениях или при прикосновении, в результате чего больные падают и остаются неподвижными, как при параличе.

По данным мировой статистики, примерно в 40–50 % случаев цветения происходит развитие токсигенных цианобактерий. В настоящее время развитие токсигенных цианобактерий приобретает глобальный характер, что обусловлено усилением антропогенного загрязнения водных объектов. Как национальную проблему рассматривают токсичные цветения озер в Англии, Финляндии, Норвегии. В этих странах созданы специальные центры для их изучения и контроля. В литературе описаны наблюдения токсигенных цианобактерий в ряде озер Карелии и Невской губе [Фрумин, Гильдеева, 2013].

**3. Основные источники биогенной нагрузки на водоемы.** Основными источниками загрязнения водоемов биогенными веществами служат смыв азотных и фосфорных удобрений с полей, строительство водохранилищ без надлежащей очистки ложа, сброс сточных вод, в том числе и прошедших биологическую очистку. Биогенное загрязнение в результате хозяйственной деятельности на водосборах водотоков, а также в их русле (строительство каскадов ГЭС и создание водохранилищ, рекреационные мероприятия, судоходство и т. д.) вызывает антропогенное эвтрофирование. Наиболее быстро этот процесс развивается в водоемах, водосборы которых интенсивно осваиваются сельскохозяйственным производством, в том числе полеводством (пропашные культуры, сенокосы, пастбища) и животноводством (фермы и различные комплексы). Эти источники биогенной нагрузки являются неконтролируемыми или слабоконтролируемыми, поэтому им должно быть уделено особое внимание. К такому же типу биогенной нагрузки относятся водные рекреации [Хрисанов, Осипов, 1993].

Биогенные компоненты поступают в природные экосистемы как водным, так и воздушным путем; так, сейчас в мире используется свыше 30 млн т/год мыла и детергентов (основанных на фосфатах). В Канаде, например, одному из химиков была присуждена престижная национальная премия за разработку моющих средств (стиральных порошков), не содержащих фосфора.

Биогенное загрязнение водоемов и, как следствие, их эвтрофирование является одной из наиболее актуальных проблем охраны водных объектов. Учитывая глобальный характер этой проблемы, по линии ЮНЕСКО начаты работы по контролю за эвтрофированием водоемов земного шара [Дмитриев, Фрумин, 2004].

Цель проведенного исследования заключалась в анализе дискуссионных вопросов, связанных с проблемой эвтрофирования озер.

Более пятидесяти классификаций трофического статуса водных объектов, разработанных к настоящему времени, ориентированы на различные индикаторы и их комплексы [Фрумин, Хуан, 2012]. Отсутствие единой методики оценки трофического статуса водоемов, расположенных между сопредельными странами, было и остается нерешенной проблемой международных «водных» отношений.

**4. Индексы трофического статуса.** Использование индексов трофии, среди которых наиболее популярным в последние годы является индекс Карлсона, не «сняло» проблему оценки трофности водной экосистемы. Так, например, при изучении глубоких водохранилищ США исследователи использовали 22 индекса (как химических, так и биологических). Одно из водохранилищ Техаса было отнесено ими к классу олиготрофных по 11 индексам, к классу мезотрофных по 4 индексам и к классу эвтрофных по 7 индексам [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990].

Таким образом, вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования: малоинформативных индексов; одного единственного индекса трофического состояния; индекса или группы индексов, адаптированных для условий одной климатической зоны, для определения трофности водоемов в другой климатической зоне; индексов, полученных для водных экосистем циклического типа, для водных экосистем транзитного типа, а также проведения идентификации трофического статуса водоема по натурным исследованиям одного года (сезона, съемки).

**5. Вероятностная оценка трофического статуса.** Весьма плодотворной представляется вероятностная (стохастическая) оценка трофического статуса водного объекта [Фрумин, Хуан,

2012]. Для оценки трофического статуса озер был использован вероятностный подход, ранее разработанный ОЭРК (Организация экономического развития и кооперации), и базирующийся на данных о содержании фосфора общего, средней концентрации хлорофилла «*a*» и средней глубине видимости диска Секки. Для оценки уровня трофности были использованы пять градаций: $\mu_{УО}$ – вероятность ультраолиготрофного состояния, $\mu_О$ – вероятность олиготрофного состояния, $\mu_М$ – вероятность мезотрофного состояния, $\mu_Э$ – вероятность эвтрофного состояния и $\mu_{ГТ}$ – вероятность гипертрофного состояния. Кривые вероятностной классификации трофического статуса озер, разработанные ОЭРК, были аппроксимированы аналитическими зависимостями (табл. 1–3). Во всех случаях должно выполняться следующее уравнение:

$$\mu_{уо} + \mu_о + \mu_м + \mu_э + \mu_{гт} = 1, \text{ или } 100\ \% . \quad (1)$$

**Таблица 1.** Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год концентрациям фосфора общего (мг/м$^3$)

**Table 1.** Formulas for calculating the probabilities of the trophic status of water bodies based on the annual average concentrations of total phosphorus (mg/m$^3$)

| Трофический статус | Формула |
|---|---|
| Ультраолиготрофный | $\mu(TP)_{уо} = 1 - \exp\{-\exp[-0{,}357\cdot(TP) + 1{,}25]\}$ |
| Олиготрофный | $\mu(TP)_о = 0.66\cdot\exp\{-[-0{,}947\cdot\ln(TP/8)]^2\}$ |
| Мезотрофный | $\mu(TP)_м = 0.66\cdot\exp\{-[-0{,}995\cdot\ln(TP/26)]^2\}$ |
| Эвтрофный | $\mu(TP)_э = 0.66\cdot\exp\{-[-0{,}964\cdot\ln(TP/89)]^2\}$ |
| Гипертрофный | $\mu(TP)_{гт} = \exp\{-\exp[-0{,}0123\cdot(TP) + 1{,}65]\}$ |

**Таблица 2.** Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год концентрациям хлорофилла «*a*» (мг/м$^3$)

**Table 2.** Formulas for calculating the probabilities of the trophic status of water bodies based on the annual average concentrations of chlorophyll "*a*" (mg/m$^3$)

| Трофический статус | Формула |
|---|---|
| Ультраолиготрофный | $\mu(Chl«a»)_{уо} = 1 - \exp\{-\exp[-2{,}281\cdot(Chl\ «a»)^{0,9} + 1{,}6547]\}$ |
| Олиготрофный | $\mu(Chl«a»)_о = 0{,}62\cdot\exp\{-[-0{,}8757\cdot\ln(Chl\ «a»/1{,}5)]^2\}$ |
| Мезотрофный | $\mu(Chl«a»)_м = 0.62\cdot\exp\{-[-1{,}0037\cdot\ln(Chl\ «a»/4{,}8)]^2\}$ |
| Эвтрофный | $\mu(Chl«a»)_э = 0.62\cdot\exp\{-[-0{,}9495\cdot\ln(Chl\ «a»/15)]^2\}$ |
| Гипертрофный | $\mu(Chl«a»)_{гт} = \exp\{-\exp[-0{,}6455\cdot(Chl\ «a»)^{0,5} + 2{,}958]\}$ |

**Таблица 3.** Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год величинам прозрачности воды по диску Секки (SD) (м)

**Table 3.** Formulas for calculating the probabilities of the trophic status of water bodies based on the annual average Secchi-disk (SD) water transparency (m)

| Трофический статус | Формула |
|---|---|
| Ультраолиготрофный | $\mu(SD)_{уо} = \exp\{-\exp[(-0{,}7028\cdot SD^{0{\cdot}6} + 3{,}275)\}$ |
| Олиготрофный | $\mu(SD)_о = 0{,}55\cdot\exp\{-[-1{,}2818\cdot\ln(SD/11)]^2\}$ |
| Мезотрофный | $\mu(SD)_м = 0{,}55\cdot\exp\{-[-1{,}2683\cdot\ln(SD/5)]^2\}$ |
| Эвтрофный | $\mu(SD)_э = 0{,}55\cdot\exp\{-[(-1{,}2878\cdot\ln(SD/2{,}3)]^2\}$ |
| Гипертрофный | $\mu(SD)_{гт} = 1 - \exp\{-\exp[-1{,}5837\cdot(SD)^{0,9} + 2{,}144]\}$ |

**6. Допустимые фосфорные нагрузки.** Первое приближение величины допустимой фосфорной нагрузки ($L_{доп}$, гР/м$^2$·год), позволяющей водоему оставаться в олиготрофном состоянии, было предложено Фолленвайдером [Гусаков, 1987]:

$$L_{доп} = 0{,}025 \cdot H^{0,6}, \quad (2)$$

где H – средняя глубина водоема, м.

В работе [Vollenweider, Dillon, 1974] выведено более общее выражение для критической фосфорной нагрузки (метод Фолленвайдера и Диллона):

$$L_{кр} = [P]_{кр} \cdot H/\tau \cdot (1 + \tau^{0,5}), \quad (3)$$

где $[P]_{кр}$ – критическая концентрация общего фосфора при весеннем перемешивании, мг/л; H – средняя глубина водоема, м; $\tau$ – время полного водообмена, год.

Критическую концентрацию фосфора в период весеннего перемешивания принимают равной 20 мкг/л. Сойером и Томасом в качестве граничных концентраций фосфора между олиготрофными и мезотрофными озерами была предложена величина 0,01 мгР/л [Гусаков, 1987]. В этом случае выражение для допустимой фосфорной нагрузки приводится к следующему виду:

$$L_{доп} = 0{,}01 \cdot H/\tau \cdot (1 + \tau^{0,5}). \quad (4)$$

Как следует из приведенных формул, методика расчета допустимой фосфорной нагрузки Фолленвайдера базируется только на одном морфометрическом показателе (средняя глубина водоема), а методика Фолленвайдера и Диллона – на одном морфометрическом показателе (средняя глубина водоема) и одном гидрологическом показателе (время полного водообмена). Ни одна из этих методик не учитывает ассимиляционную (самоочистительную) способность водоема.

Согласно П. А. Лозовику, за ассимиляционную (или самоочистительную) способность водного объекта следует принимать истинную скорость трансформации вещества в воде [Лозовик, 2015]. Допустимая фосфорная нагрузка рассчитывается по следующей формуле:

$$L_{доп} = As + L, \quad (5)$$

где $As$ – ассимиляция фосфора в водном объекте, $L$ – внешняя нагрузка на водоем.

Соотношение ассимиляции и внешней нагрузки на водный объект рассчитывается по уравнению:

$$As/L = k\,(1 - R)\,(\tau + 1), \quad (6)$$

где $k$ – константа скорости трансформации, год – 1, $R$ – удерживающая способность в водном объекте.

Удерживающая способность фосфора в водном объекте рассчитывается по формуле:

$$R/1 - R = 0{,}14\tau + 0{,}49. \quad (7)$$

Константу скорости трансформации можно рассчитать, используя следующую формулу:

$$k = R/\tau\,[1 - R \cdot \exp(-1/\tau)]. \quad (8)$$

Расчет ассимиляционной способности водного объекта ($As$):

$$As = kC_{оз}V_{сток}(\tau + 1), \quad (9)$$

где $C_{оз}$ – концентрация фосфора, соответствующая олиготрофному статусу, мкг/л; $V_{сток}$ – сток из озера, км$^3$.

Для расчета природного содержания фосфора в водоеме автором данной статьи использована модель Фолленвайдера (2). К примеру, средняя глубина озера Имандра H = 16 м, площадь зеркала S = 876 км$^2$, объем V = 11,2 км$^3$. Допустимая фосфорная нагрузка: $L_{доп} = 0{,}025 \cdot H^{0,6} = 0{,}025 \cdot 160{,}6 \cdot 876 = 115{,}6$ т и природное (фоновое) содержание фосфора $C_{при} = 115{,}6/11{,}2 = 10{,}3$ мкг/л.

В табл. 4–6 приведены результаты расчетов вероятностей трофического статуса некоторых водных объектов, расположенных в различных природно-климатических зонах.

**Таблица 4.** Вероятности трофического статуса пресноводных озер по содержанию фосфора общего (%)

**Table 4.** Probabilities of the trophic status of freshwater lakes in terms of total phosphorus content (%)

| Озеро | Государство | TP, мг/м$^3$ | $\mu_{уо}$ | $\mu_{о}$ | $\mu_{м}$ | $\mu_{э}$ | $\mu_{гт}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ладожское | Россия | 11 | 5 | 60 | 32 | 2 | 1 |
| Онежское | Россия | 12 | 3 | 57 | 37 | 2 | 1 |
| Псковское | Россия | 85 | 0 | 0 | 17 | 67 | 16 |
| Ильмень | Россия | 90 | 0 | 0 | 14 | 67 | 19 |
| Нарочь | Белоруссия | 16 | 0 | 43 | 52 | 4 | 1 |
| Akan | Япония | 32 | 0 | 12 | 63 | 24 | 1 |
| Hjalmaren | Швеция | 43 | 0 | 5 | 51 | 40 | 4 |
| Poyang | Китай | 97 | 0 | 0 | 12 | 66 | 22 |
| Dongting | Китай | 119 | 0 | 0 | 7 | 62 | 31 |
| Taihu | Китай | 52 | 0 | 3 | 41 | 50 | 6 |
| Hongze | Китай | 140 | 0 | 0 | 5 | 55 | 40 |
| Chaohu | Китай | 105 | 0 | 0 | 10 | 65 | 25 |

**Таблица 5.** Вероятностная оценка трофического статуса Невской губы по содержанию хлорофилла «*a*»

**Table 5.** Probabilistic assessment of the trophic status of the Neva Bay based on chlorophyll "*a*" content

| Год | Chl «*a*», мг/м$^3$ | $\mu_о$ | $\mu_м$ | $\mu_э$ | $\mu_{гт}$ | Трофический статус |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1987 | 3,7 | 0,33 | 0,57 | 0,10 | 0,00 | мезотрофно-олиготрофный |
| 2000 | 17,7 | 0,01 | 0,11 | 0,60 | 0,28 | эвтрофно-гипертрофный |
| 1984–2005 | 7,7 | 0,08 | 0,50 | 0,42 | 0,00 | мезотрофно-эвтрофный |

**Таблица 6.** Вероятностная оценка трофического статуса Нарвского водохранилища по глубине видимости диска Секки

**Table 6.** Probabilistic assessment of the trophic status of the Narva Reservoir based on Secchi-disk visibility depth

| Год | SD, м | $\mu_э$ | $\mu_{гт}$ | Трофический статус |
|---|---|---|---|---|
| 2007 | 0,35 | 0,01 | 0,99 | гипертрофный |
| 2008 | 0,44 | 0,02 | 0,98 | гипертрофный |
| 2009 | 0,48 | 0,02 | 0,98 | гипертрофный |
| 2010 | 0,40 | 0,01 | 0,99 | гипертрофный |

Для расчетов допустимых фосфорных нагрузок на некоторые озера в табл. 7 приведены их морфометрические и гидрологические характеристики.

**Таблица 7.** Морфометрические и гидрологические характеристики озер

**Table 7.** Morphometric and hydrological characteristics of lakes

| Озеро | Средняя глубина, м | Объем, км$^3$ | Площадь, км$^2$ | Сток, км$^3$ |
|---|---|---|---|---|
| Телецкое | 174 | 40 | 223 | 15 |
| Онежское | 30 | 295 | 9720 | 18,88 |
| Ладожское | 51 | 910 | 17 700 | 77,69 |
| Имандра | 16 | 11,2 | 876 | 5,17 |
| Топозеро | 15,9 | 15,6 | 986 | 1,201 |
| Нотозеро | 15 | 11,5 | 745 | 7,61 |
| Чудское | 7,5 | 21,8 | 2613 | 12,58 |
| Селигер | 5,8 | 1,22 | 260 | 0,63 |
| Крошнозеро | 5,7 | 0,0505 | 8,9 | 0,0574 |
| Белое | 4,1 | 5,2 | 1284 | 5,42 |

По данным, приведенным в табл. 7, были рассчитаны период водообмена (τ), удерживающая способность фосфора в водном объекте (*R*) и константы скорости трансформации фосфора (*k*) (табл. 8).

**Таблица 8.** Период водообмена (τ), удерживающая способность озер (*R*) и константы скорости трансформации фосфора (*k*)

**Table 8.** Residence times (τ), retention capacity of lakes (*R*), and rate constants of phosphorus transformation (*k*)

| Озеро | τ, год | *R* | *k*, год$^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Телецкое | 2,67 | 0,46 | 0,25 |
| Онежское | 15,6 | 0,73 | 0,15 |
| Ладожское | 11,7 | 0,68 | 0,15 |
| Имандра | 2,17 | 0,44 | 0,28 |
| Топозеро | 13 | 0,70 | 0,15 |
| Нотозеро | 1,51 | 0,41 | 0,34 |
| Чудское | 1,73 | 0,42 | 0,32 |
| Селигер | 1,94 | 0,43 | 0,30 |
| Крошнозеро | 0,88 | 0,38 | 0,63 |
| Белое | 0,96 | 0,38 | 0,46 |

В обобщенном виде результаты расчетов допустимых фосфорных нагрузок на рассмотренные озера приведены в табл. 9.

**Таблица 9.** Допустимые фосфорные нагрузки на озера (т/год)

**Table 9.** Permissible phosphorus loads on lakes (t/year)

| Озеро | Метод Фолленвайдера | Метод Фолленвайдера и Диллона | Метод Лозовика |
|---|---|---|---|
| Телецкое | 123 | 383 | 128 |
| Онежское | 1870 | 924 | 736 |
| Ладожское | 4682 | 3408 | 1993 |
| Имандра | 116 | 160 | 142 |
| Топозеро | 130 | 56 | 55 |
| Нотозеро | 95 | 165 | 159 |
| Чудское | 219 | 263 | 327 |
| Селигер | 18,7 | 18,6 | 25,2 |
| Крошнозеро | 0,63 | 1,1 | 2,0 |
| Белое | 75 | 109 | 196 |

**Выводы**

1. Результаты расчетов по модели Фолленвайдера следует рассматривать как ориентировочные, поскольку они не учитывают время водообмена озера, независимости биогенной нагрузки от поступления биогенных элементов из донных отложений и седиментационного фактора, учитывающего удержание биогенов в водоеме.

2. Достоверность и точность величины допустимой фосфорной нагрузки на водный объект, позволяющие ему оставаться в олиготрофном статусе, зависят от метода расчета.

3. Отличительная особенность метода расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера, разработанного П. А. Лозовиком, по сравнению с традиционно используемыми методами Фолленвайдера и Диллона, заключается в том, что он учитывает не только морфологические и гидрологические характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную способность в отношении соединений фосфора.

*Работа выполнена в Российском государственном педагогическом университете им. А. И. Герцена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0016).*

## Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные проблемы лимнологии, сформулированные Международным лимнологическим комитетом?
2. Что такое эвтрофирование водного объекта?
3. Какой из биогенных элементов играет решающую роль в процессе эвтрофирования водоемов умеренной зоны?
4. Какие существуют категории трофического статуса водного объекта?
5. Каковы основные источники поступления биогенных веществ в водные объекты?

## Задания

1. Рассчитайте вероятности трофического статуса Онежского озера при концентрации фосфора общего 12 мг/м$^3$.
2. Рассчитайте методом Фолленвайдера допустимую фосфорную нагрузку на озеро Имандра.

## Литература

*Батян А. Н., Фрумин Г. Т., Базылев В. Н.* Основы общей и экологической токсикологии. СПб.: СпецЛит, 2009. 352 с.

ГОСТ 17.1.1.01.-77. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод.

*Гусаков Б. Л.* Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема / Элементы круговорота фосфора в водоемах / под ред. Н. А. Петровой и Б. Л. Гутельмахера. Л.: Наука, 1987. 104 с.

*Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т.* Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2004. 294 с.

*Лозовик П. А.* Нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты с экологических и геохимических позиций // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»: сборник научных трудов конференции «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года» (Петрозаводск, 06–11 июля 2015 г.). Петрозаводск, 2015. С. 446–452.

*Фрумин Г. Т., Гильдеева И. М.* Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема // Экологическая химия. 2013, 22(4). С. 191–197.

*Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж.* Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.

*Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р.* Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 280 с.

*Хрисанов Н. И., Осипов Г. К.* Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 278 с.

*Vollenweider R. A., Dillon P. I.* The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research // Nat. Res. Counc. Canada NRO Assoc. Comm. Sci criteria. Envir. Quality NRCC. 1974. N 13690. 42 p.

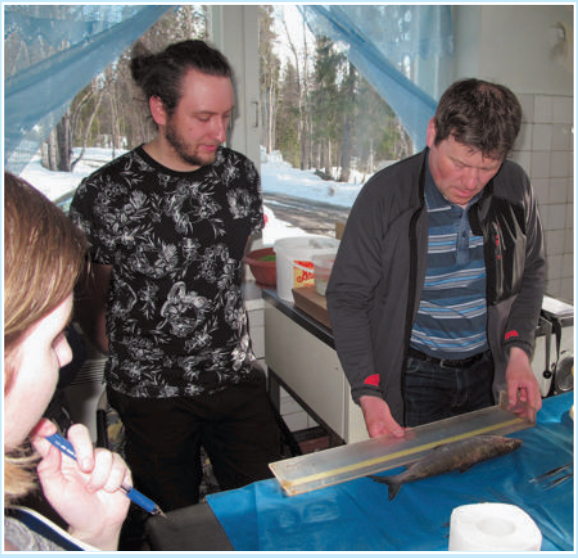
## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Фрумин Григорий Тевелевич**
профессор, ведущий научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории
факультета географии, д.х.н.
Российский государственный педагогический
университет им. А. И. Герцена
наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186
эл. почта: gfrumin@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

**Frumin, Grigory**
Herzen State Pedagogical University of Russia
48, Nab. R. Moiki, 191186,
St. Petersburg, Russia
e-mail: gfrumin@mail.ru

# ГИДРОБИОЛОГИЯ
# HYDROBIOLOGY












УДК 502.175:574.5

# БИОИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

**Д. Б. Денисов**

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,*
*ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия*

**Аннотация.** В лекции анализируется специфика биоиндикации арктических пресных вод в рамках комплексного экологического мониторинга. В связи с развитием горнопромышленного комплекса водные объекты Арктической зоны РФ (АЗРФ) развиваются в условиях мощного антропогенного пресса, повлекшего за собой деградацию качества водных ресурсов. В то же время успешное социально-экономическое развитие северных регионов не представляется возможным без промышленного кластера. В этих условиях развитие систем оценки качества вод является важнейшей экологической задачей. Многочисленные исследования подтверждают высокую эффективность биоиндикации благодаря широкому спектру возможностей, сравнительной простоте и экономической целесообразности. При этом необходимо учитывать специфику арктических пресноводных экосистем, условия развития которых отличаются коротким гидробиологическим летом, низкими температурами, малым содержанием биогенных элементов, что делает их наиболее уязвимыми к антропогенной нагрузке. Новым экологическим вызовом для высоких широт стало потепление климата, что в сочетании с загрязнением и эвтрофикацией привело к изменению биоразнообразия, инвазиям новых и изменению численности аборигенных видов гидробионтов, трансформации трофических сетей и сокращению численности представителей типичной арктической биоты. Показана индикаторная роль различных групп гидробионтов, населяющих арктические водоемы, в первую очередь сообщества водорослей и цианопрокариот, зоопланктона и бентоса. Несмотря на широко развернувшиеся экологические исследования в АЗРФ, требуются дальнейшие исследования перспективных групп организмов-биоиндикаторов с целью анализа формирования адаптационных механизмов и перспектив восстановления нарушенных водоемов, а также разработки адекватных систем управления и рационального использования водных ресурсов.

**Ключевые слова:** биоиндикация; пресные воды; Арктика; загрязнение; эвтрофикация; тяжелые металлы.

## BIOINDICATION OF ARCTIC FRESHWATER ECOSYSTEMS

**D. B. Denisov**

*Institute of North Industrial Ecology Problems,*
*Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*

**Summary.** The lecture addressed the specific approaches to Arctic freshwaters bioindication within the framework of integrated environmental monitoring. Waters in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) are exposed to mining impacts and heavy anthropogenic pressure, which affect the quality of the water resources. At the same time, successful socio-economic development of northern regions is impossible without an industrial cluster. In this context, the development of water quality assessment systems is a major environmental task. Numerous studies confirm the high efficiency of bioindication due to its wide range of capabilities, comparative simplicity, and economic feasibility. At the same time, it is necessary to take into account the specifics of Arctic freshwater ecosystems, which develop in the settings of a short hydrobiological summer, low temperatures and shortage of nutrients, and are therefore highly vulnerable to anthropogenic impact. A new environmental challenge for high latitudes is climate warming combined with pollution and eutrophication, which have led to changes in biodiversity, invasions of new and changes in the numbers of native aquatic species, transformation of food webs, and a decline of typical Arctic species populations. The indicator role of various groups of aquatic organisms inhabiting Arctic water bodies, primarily communities of algae and cyanobacteria, zooplankton and benthos, has

been demonstrated. Despite the ongoing large-scope environmental research in the Russian Arctic, further studies on promising groups of organisms – bioindicators, are needed to analyze the newly forming adaptive mechanisms and the prospects for the restoration of disturbed water bodies, as well as to work out adequate management and use systems for the water resources.
**Keywords:** bioindication; freshwaters; Arctic; pollution; eutrophication; heavy metals.

**Тема лекции.** «Биоиндикация состояния арктических пресноводных экосистем».

**Цель.** Организация целенаправленной познавательной деятельности ученых-лимнологов по методологии биондикации в арктических пресноводных экосистемах.

**Задачи.** Сформировать теоретические и практические знания о современных методах биоиндикации в условиях АЗРФ, экологических особенностях арктических пресноводных экосистем. Выработать навыки рационального выбора биоиндикационной системы и набора биоиндикаторов. Развить умения комплексной оценки качества вод. Познакомиться с примерами результатов оценки состояния арктических водоемов методами биоиндиации.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Основные принципы систем биоиндикации.
2. Специфика развития экосистем водоемов Арктики.
3. Современные подходы к биоиндикации арктических водоемов.

Заключение.

## Изложение материала

**Введение.** Поддержание качества пресных вод на уровне, отвечающем различным потребностям населения, является приоритетной стратегической задачей обеспечения экологической безопасности в Арктике. В то же время социально-экономическое развитие АЗРФ обеспечивает мощный горнопромышленный комплекс, деятельность которого обострила проблемы экологической безопасности, рационального использования и качества пресных вод. Дальнейшая эксплуатация природных ресурсов и развитие промышленности не представляется возможными без достоверной оценки состояния пресноводных экосистем, что служит научно обоснованной базой для адаптации природопользования к наблюдаемым изменениям и минимизации негативных последствий, а также для принятия управленческих решений. Современное потепление климата выступает одним из модуляторов антропогенно-обусловленных процессов загрязнения и эвтрофирования пресноводных экосистем в зонах интенсивного природопользования арктической зоны, где температурный режим выступает в качестве лимитирующего развитие организмов фактора. Поэтому интерпретация и вскрытие причин структурно-функциональных перестроек экосистем внутренних водоемов Баренцева / Евро-Арктического региона, наблюдаемых в последние десятилетия, требуют комплексного анализа с обязательным применением методов биоиндикации. Фундаментальная значимость и актуальность биондикации качества водной среды в условиях изменяющихся глобальных и региональных факторов окружающей среды определяются необходимостью разработки адекватной, научно обоснованной системы рационального использования водных ресурсов, что является залогом успешного социально-экономического развития Арктической зоны РФ.

**1. Основные принципы систем биоиндикации.** *Биоиндикация* пресных водоемов представляет собой использование системы оценки состояния и(или) изменений экосистем на основе изучения различных показателей гидробионтов и(или) их сообществ. В отличие от других форм оценки качества вод, например физико-химических, биоиндикацию отличает высокая эффективность, которая определяется целым рядом положений [Markert et al., 2003; Oertel, Salánki, 2003; Методы…, 2011; Barinova, 2017; Zolkefli et al., 2020]:

1. Гидробиологические показатели организмов-индикаторов дают возможность оценить «здоровье» экосистемы: при суммировании влияния всех биологически значимых видов воздействия они отражают состояние водной среды в целом.

2. Биоиндикация обладает высокой чувствительностью, так как организмы-индикаторы могут реагировать даже на предельно малые воздействия фактора, которые сложно зафиксировать с помощью физико-химических методов, а также позволяют регистрировать накопленное влияние вследствие кумулятивного эффекта и сам факт воздействия после обнуления фактора.

3. Многие методы биоиндикации являются экономически целесообразными и характеризуются сравнительной простотой и скоростью выполнения аналитических процедур, при этом позволяют оценить не только состояние водоема, но и ущерб для экосистемных услуг (например, питьевой воды, промысловых гидробионтов, рекреационного потенциала водоема).

4. Биондикация отличается широким спектром возможностей и огромным потенциалом: помимо интегральной оценки качества среды, для анализа воздействия определенного типа можно выделять специфические биоиндикаторы.

5. Биондикация позволяет анализировать синергетическое и антагонистическое действие, получать информацию о вторичных эффектах воздействия факторов (например, накопление и трансформация загрязнителей), рассчитывать критические уровни нагрузки.

6. С помощью биоиндикации можно отслеживать пространственно-временные закономерности трансформации водных экосистем как результат мониторинговых наблюдений, анализировать сукцессионные и эволюционные изменения, оценивать скорость происходящих процессов.

7. В некоторых случаях биоиндикация – единственный способ получить информацию о качестве среды, что справедливо в первую очередь для палеолимнологических исследований, реконструкций исторического развития экосистем.

8. Методы биоиндикации постоянно развиваются и совершенствуются: для стран ЕС и США приняты системы, характеризующиеся определенной универсальностью (WFD – Water Framework Directive, RBPs – Rapid Bioassessment Protocols и др.), что расширяет возможности для сравнительного анализа.

Оценка состояния водных ресурсов методами биоиндикации в настоящее время является наиболее широко используемой и перспективной. Именно сообщества живых организмов, непосредственно испытывающие воздействие тех или иных факторов и реагирующие на них, являются теми функциональными элементами водных экосистем, которые позволяют получить адекватную и объективную информацию о состоянии водоемов. При этом важно знать не только видовой состав водных организмов, но и их количественные характеристики. Данные о численности гидробионтов являются базой для расчета различных комплексных индексов (в том числе и включенных в систему государственного комплексного экологического мониторинга), позволяющих сделать вывод о качестве среды, оценить продукционный потенциал, особенности распространения и соотношение видов в сообществах.

Основные принципы биоиндикации пресных вод, основанные на системе *сапробности*, были сформулированы еще в начале прошлого века [Kolkwitz, Marsson, 1902, 1908, 1909]. С тех пор происходит непрерывное развитие и совершенствование биоиндикации, которая стала обязательным инструментом комплексного экологического мониторинга водных экосистем и экологического нормирования [Шитиков и др., 2003; Семенченко, 2004; Баринова и др., 2006; Моисеенко, 2009; Barinova, 2017a, b, c; Методы…, 2019; Manickavasagam et al., 2019; Kumari, Paul, 2020].

В отличие от наземных экосистем, любой гидробионт или сообщество водных организмов может выступать в качестве биоиндикатора. Это могут быть организмы и их сообщества, биоценозы, а также биологические процессы (воспроизводство, продуктивность и пр.) и суборганизменные маркеры (патологические, биохимические, генетические и др.). Сущность процесса биоиндикации сводится к регистрации и анализу ответной реакции биоиндикаторов на изменения в окружающей среде для идентификации и(или) количественной оценки этих изменений. Реакции биоиндикаторов могут проявляться на различных уровнях организации живого: 1) на уровне сообществ – изменение плотности популяции и видового разнообразия; 2) на уровне организма – изменение режима питания, поведения, размножения и т. д.; 3) на суборганизменном уровне – изменения физиологических процессов, биоаккумуляция загрязнителей, генетические изменения и т. д. [Чуйко и др., 2018; Manickavasagam et al., 2019]. На рис. 1 – блок-схема эффектов, которые может вызывать воздействие фактора на разных уровнях биологической организации.




**Рис. 1.** Блок-схема эффектов, которые может вызывать воздействие фактора на разных уровнях биологической организации [Чуйко, 2014]

**Fig. 1.** Flowchart of the effects elicited by an impact at different levels of biological organization [Chuiko, 2014]

В самом общем виде биоиндикационная оценка экологического состояния водных объектов в рамках комплексного экологического мониторинга включает ряд последовательных этапов (рис. 2). На первом этапе определяются цель и задачи исследования, исходя из которых намечаются станции (створы, пункты) наблюдения (отбора проб), сроки и периодичность отбора проб. Затем проводится анализ полученного материала: таксономический анализ, подсчет количественных показателей (численность, биомасса, соотношение таксонов, физиологические параметры, морфологические характеристики и т. д.). Следующий этап – это оценка экологической толерантности выявленных таксонов гидробионтов и их сообществ; регистрация и количественная оценка нарушений; сравнение с фоновыми и(или) контрольными показателями. На основании полученных данных проводится расчет необходимых индексов и других комплексных и специальных показателей, например, индесов таксономического разнообразия, сапробности, загрязнения, Вудивисса, олигохетного и др., при необходимости проводят оценку продуктивности, скорости деструкции, содержания хлорофиллов, определяют трофический статус вод. На этом же этапе полученные результаты сравнивают с данными, полученными с помощью других методов, например, с гидрохимическими показателями. Так, если в воде обнаружено высокое содержание биогенных элементов (соединений азота и фосфора), то этим можно объяснить высокую биомассу планктона. Сходные результаты, полученные с помощью различных биоиндикаторов, подтвержденные физико-химическими методами, являются залогом высокой достоверности выводов о качестве среды. В ходе заключительного этапа проводят сравнение полученных результатов с соответствующими экологическими нормативами и делают выводы о состоянии экосистемы, наличии и уровне загрязнения (или других нарушений), условиях формирования качества вод и пр. исходя из поставленных задач. В зависимости от полноты и достоверности данных комплексного экологического мониторинга могут быть выработаны рекомендации по управлению качеством среды и состоянием водных экосистем, например, контроль объемов сточных вод (см. рис. 2).




**Рис. 2.** Общая схема оценки состояния экосистемы с помощью биоиндикации

**Fig. 2.** Flowchart for water quality and aquatic environments bioindication

Использование биоиндикации наиболее целесообразно в комплексе с другими методами оценки качества среды. В зависимости от поставленных задач и наличия ресурсов (финансовых, трудовых, материально-технических и др.) результаты биоиндикации могут быть верифицированы с помощью физико-химических методов, например, геохимических исследований воды и донных отложений, и наоборот (рис. 3). Важнейшим блоком в оценке состояния экосистем с помощью биоиндикации является изучение биоразнообразия.

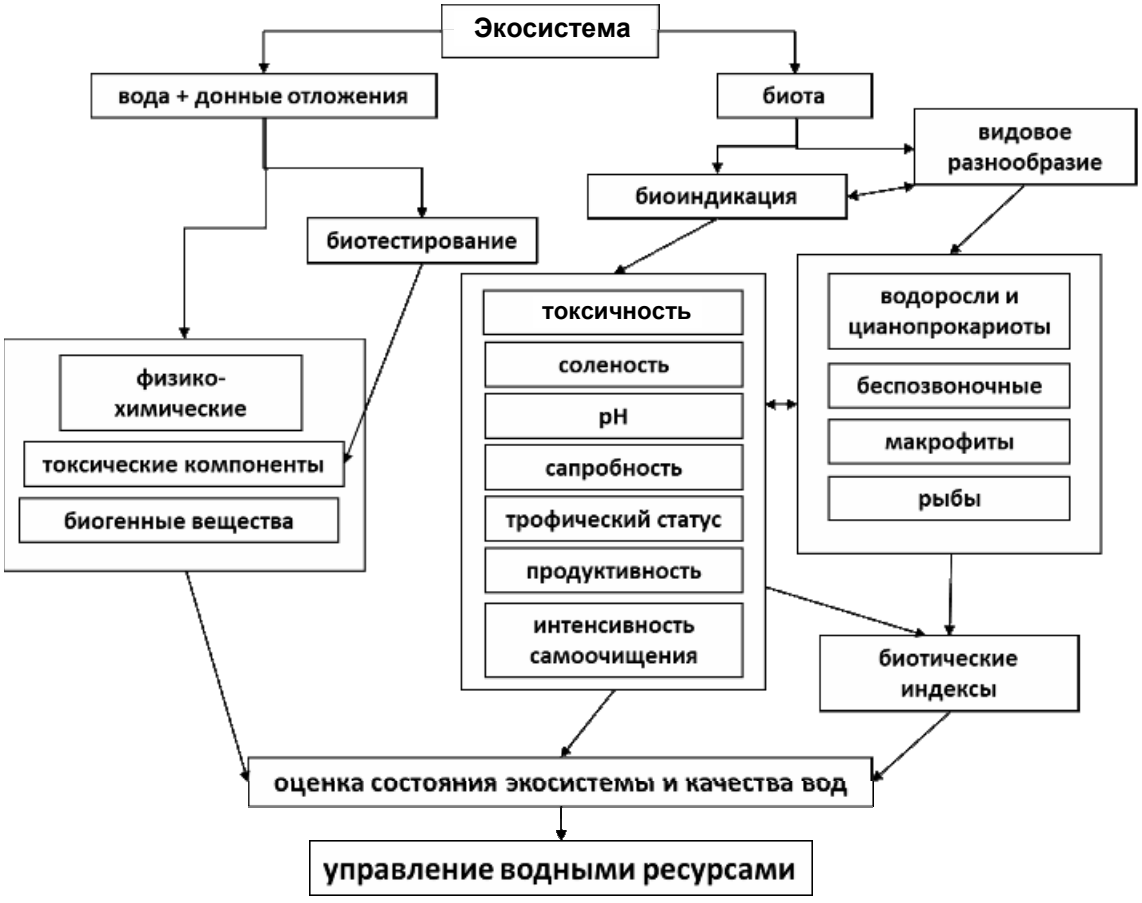



**Рис. 3.** Место биоиндикации в системе комплексного экологического мониторинга водных экосистем

**Fig. 3.** Bioindication in the system of the integrated ecological monitoring of aquatic ecosystems

В настоящее время сохранение биологического разнообразия принадлежит к числу основных экологических проблем современности в связи с усиливающимся антропогенным влиянием на экосистемы. Актуальность приобретают методы и критерии его оценки как научной основы организации мероприятий по изучению и прогнозированию динамики изменения биоразнообразия, наряду с изучением его функционального значения в экосистемах. Исследования биологического

разнообразия базируются преимущественно на численном его выражении в результате вычисления различных индексов, на основе которых возможна оценка и сравнительный анализ. Такая оценка должна базироваться не только на надежной инвентаризации таксонов организмов, но и на корректности использования математического аппарата.

Существует несколько путей оценки биоразнообразия. Одно из направлений – подсчет числа видов, находящихся в пробах, обитающих в данной экосистеме или ее пространственной единице. Видовое разнообразие, выраженное числом видов (или таксонов, включая внутривидовые категории), отражает лишь степень *видового богатства*, то есть числа особей, причисленных к одному таксону, обитающих на анализируемой акватории. Число видов объективно, не всегда может рассматриваться как критерий биоразнообразия, так как зависит как от особенностей постановки задачи исследования, так и множества разнообразных факторов, связанных с выбором объекта. Тем не менее число видов как показатель общего числа организмов, которые могут быть обнаружены в данном местообитании, представляет собой наиболее простой критерий биоразнообразия, независимый от численности и соотношения организмов. Видовое богатство, или плотности видов, а также выравненность, по мнению Ю. Одума, является одним из компонентов видового разнообразия [Одум, 1975]. Выравненность представляет собой показатель, основанный на значимости отдельного таксона.

Использование наиболее распространенных индексов видового разнообразия – Шеннона-Уивера (1949), Симпсона (1949), Бергера-Паркера (1970), Маргалефа (1956) и др. – при различных экологических исследованиях и для задач биоиндикации во многом обусловлено традицией [Денисов, 2012]. Если разнообразие определенных сообществ организмов исторически (в традициях данной научной школы) принято оценивать с помощью определенного индекса (набора индексов), то такой способ оценки разнообразия входит в практику будущих исследований. Например, чрезвычайно широкое распространение имеет индекс Шеннона, хотя исследователь не всегда может четко объяснить, по каким причинам он использует именно этот критерий оценки таксономического разнообразия, а не какой-либо другой.

Использование одних и тех же ставших «традиционными» индексов позволяет проводить сравнительный анализ многолетней динамики биоразнообразия исследуемых групп организмов, сравнение с данными предыдущих исследований, а также сопоставлять видовое разнообразие в различных регионах и местообитаниях. Повсеместное использование одного и того же индекса обуславливает сопоставимость выводов, сделанных разными исследователями при изучении одной группы организмов различных местообитаний. При таком подходе зачастую отсутствует какой-либо творческий поиск новых, может быть более адекватных критериев оценки биологического разнообразия в угоду «универсальности» и «традиции» [Денисов, 2012].

Проблемы при использовании индексов могут быть вызваны отсутствием у исследователя информации о сути, базовых принципах расчета индекса, который в данном случае используется как инструмент, позволяющий получить некую цифру. Выбор индекса для конкретных задач оценки биоразнообразия должен базироваться на знании принципов расчета и физическом (математическом) смысле используемого показателя, с учетом особенностей биологических объектов: сложность структуры сообществ, набор групп организмов, объем выборок, их случайность и пр.

По мнению Г. С. Розенберга [2010], оценка биоразнообразия в пространстве видов в значительной мере является некорректной процедурой в силу того, что при этом не учитывается морфологическое, функциональное, экологическое сходство/различие между самими видами. Каждый вид представляется как изолированный таксон, информационно равноудаленный от всех остальных.

Для расчета индекса Шеннона в качестве эталона принимается экосистема с равными обилиями всех видов, когда данный показатель принимает максимальное значение, что не вполне соответствует структуре реальных природных сообществ и должно учитываться при проведении биоиндикации качества среды на базе данного критерия.

Применение индексов Маргалефа и Менхиникка для оценки видового разнообразия сообществ организмов, выборки которых могут носить случайный характер, ограничено. Так, сложно на практике получить репрезентативную выборку планктонных организмов из водоема, ибо их видовое богатство сравнительно велико, а в пробы попадает лишь некий набор таксонов, не всегда

отражающий реальную картину видового разнообразия данного водоема. До настоящего времени продолжаются споры о методике количественных подходов, необходимом и достаточном количестве биологической информации (числа инвентаризированных таксонов, проб, повторностей) для адекватной оценки биологического разнообразия. Исследователи расходятся во мнениях, сколько, например, следует просчитать клеток водорослей под микроскопом, чтобы этого было достаточно для оценки видового разнообразия.

Исследования в области биологического разнообразия приобретают всё большую актуальность. Наиболее разнообразное сообщество является «стратегическим запасом» биологической эволюции, а следовательно, количественное определение таких уникальных сообществ позволяет обеспечить им охранный статус. Важнейшим направлением количественной оценки является определение доли редких и обильных таксонов, а также их влияния на структуру сообществ в целом; близким направлением является оценка доминирования видов, в рамках концепции которой используется понятие значимости вида.

Стратегия анализа биологического разнообразия требует прежде всего количественной и сравнительной оценки его в природных экосистемах различного уровня. Комплексная оценка всех критериев биоразнообразия позволяет понять степень устойчивости изучаемой экосистемы, уровень антропогенного воздействия на ее структуру, роль и место редких видов растений и животных в данной экосистеме. Перспективным направлением в разработке новых и применении существующих критериев оценки биологического разнообразия является междисциплинарный подход, когда математический аппарат корректно используется в экологических исследованиях.

Исследования сообществ организмов и экосистем на основе математического моделирования показывают, что биоразнообразие является одним из основных критериев их стабильности и устойчивости [Денисов, 2012]. Формализация понятия «биоразнообразие» до уровня математического выражения упрощает разработку моделей и их анализ в вычислительном эксперименте, что может служить не только эффективным методом исследования роли биологического образования в эволюции и функционировании экосистем, но и позволяет разрабатывать элементы экологического нормирования для задач мониторинга и оценки качества окружающей среды.

Как показали результаты моделирования [Barinova, 2020], одни и те же значения структурных индексов Шеннона в эмпирической модели могут относиться к положительным и отрицательным изменениям в экосистеме, в зависимости от стадии сукцессии и(или) антропогенной трансформации. Таким образом, высокое видовое разнообразие, выраженное индексом Шеннона, не всегда является показателем относительного благополучия, поэтому использование только структурных показателей для оценок состояния экосистемы ограничено. Следует учитывать, что минимальные индексы Шеннона могут относиться как к естественным, так и к сильно трансформированным водоемам. Поэтому при анализе динамики биоразнообразия необходимо использовать дополнительную информацию: индексы сапробности, продукционные характеристики, трофический статус и др. По мнению проф. С. С. Бариновой, проблема взаимосвязей показателей разнообразия сообществ с другими переменными качества среды, в частности с трофическими характеристиками, еще сравнительно слабо проработана и требует дальнейшего изучения [Barinova, 2020].

**2. Специфика развития экосистем водоемов Арктики.** Водоемы Арктической зоны характеризуются целым рядом специфических черт, которые необходимо учитывать при оценке качества среды. Функционирование пресноводных экосистем определяется природно-климатическими условиями и многофакторным антропогенным воздействием, имеющим как глобальный, так и локальный характер. Распределение источников мощного промышленного загрязнения на территории АЗРФ носит очаговый характер, что обуславливает экстремально высокую нагрузку на сравнительно небольшой территории и аэротехногенное загрязнение удаленных от урбанизированных районов водных объектов. В последние годы процессы антропогенной трансформации водных экосистем происходят на фоне глобальных и региональных климатических изменений, которые наиболее ярко проявляются в высокоширотных регионах Арктики и Субарктики. Происходят изменения скорости продукционных процессов, трофической структуры гидробионтов, циклов биогенных элементов, а также перестройки в видовом составе, структуре и разнообразии сообществ.

В последние десятилетия суммарный эффект воздействия потепления климата и антропогенной нагрузки на водные экосистемы Арктики проявляется в нетипичных изменениях биологического разнообразия, включая инвазивное появление новых и изменение численных показателей аборигенных видов гидробионтов. На фоне этих процессов происходят трансформация трофических сетей и сокращение численности представителей типичной арктической биоты. Эти процессы сопровождаются закономерным возникновением новых типов функционального взаимодействия гидробионтов в сообществах, в ходе которых изменяются многие количественные показатели, общий уровень продуктивности вод, их трофический статус. Поэтому применение общепринятых систем биоиндикации без учета региональных особенностей может быть не вполне оправданно [Методы…, 2019].

Спецификой сообществ гидробионтов арктических пресных вод являются способность развиваться при малом содержании элементов биогенного питания, сравнительно низких температурах, а также их адаптационные механизмы, позволяющие максимально эффективно использовать благоприятные для развития периоды в течение сравнительно короткого гидробиологического лета. Например, сообщества водорослей и цианопрокариот изначально обладают мощным потенциалом к массовому развитию при благоприятных условиях, что успешно реализуется при появлении дополнительных факторов, таких, как антропогенное эвтрофирование и потепление климата. Реакцией на дополнительные ресурсы биогенных элементов служит, как правило, увеличение продукции и биомассы гидробионтов. В зависимости от интенсивности нагрузки и типа водной экосистемы сукцессия может протекать по трем различным сценариям:

1. Более интенсивное развитие существующих в экосистеме доминантных видов, биомасса и численность которых увеличивается на несколько порядков, с одновременным ростом биологического разнообразия за счет появления новых видов;

2. Замена существующих в экосистеме доминантных видов другими, с последующим их массовым развитием. Как правило, продукционный потенциал новых видов оказывается выше. Происходит некоторое снижение биологического разнообразия;

3. Моно- или бидоминантная структура доминантного комплекса видов с их периодическим массовым развитием до экстремальных значений на фоне резкого снижения биологического разнообразия.

Реализация этих трех сценариев может происходить не только в ходе сукцессии на глобальном историческом уровне, но и проявляться в различных сочетаниях в конкретном водоеме в рамках сезонной динамики.

Характерной чертой гидролого-гидрографической структуры водных экосистем в АЗРФ является наличие сложно разветвленных озерно-речных систем, зачастую сообщающихся посредством заболоченных территорий и временных водотоков. Таким образом, воздействие, оказываемое на один из элементов водной экосистемы, неизбежно сказывается на других. Так, вследствие долговременной аэротехногенной нагрузки в Баренцевом / Евро-Арктическом регионе практически отсутствуют водные объекты, не измененные антропогенной деятельностью. Поэтому все происходящие в настоящее время изменения в той или иной степени затрагивают практически все виды водных ресурсов, включая лотические и лентические экосистемы.

Одной из основных проблем озерных экосистем является изменение естественных гидрологических режимов в связи с организацией и многолетней эксплуатацией водохранилищ. Колебания уровня и температуры воды водоемов ведут к дестабилизации их экосистем, это влияет на изменение минерализации водной среды, содержание в ней основных ионов, биогенных элементов, органических соединений, микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, что ускоряет такие негативные процессы, как эвтрофирование, закисление и загрязнение. Изменяется газовый режим водоема, что приводит к снижению содержания кислорода, особенно в зимние месяцы. В свою очередь, это обуславливает изменения окислительно-восстановительных условий в придонных областях и, как результат, – накопленные в донных отложениях тяжелые металлы могут вновь поступать в воду, увеличивая ее токсичность.

Эти процессы приводят к радикальным перестройкам биоты водоемов: исчезновению чувствительных видов гидробионтов и массовому развитию характерных для эвтрофных водоемов космополитных организмов с широким диапазоном экологической толерантности и, соответственно, к изменению структуры сообществ, снижению видового разнообразия. Искусственные колебания

уровня воды оказывают огромное влияние на сообщества зообентоса наиболее продуктивной литеральной зоны. В связи с ежегодно повторяющейся гибелью донных беспозвоночных в осушаемой зоне озер происходит потеря определенной доли пищевых ресурсов, подрыв кормовой базы типичных для олиготрофных водоемов видов рыб. Изменение условий обитания вызывает изменения видового состава рыб, занимающих верхний трофический уровень и зависящих от процессов, происходящих на более низких уровнях. Ценные лососевые и сиговые виды рыб вытесняются менее ценными (окунь, корюшка).

Значительные колебания уровня воды привели к существенным нарушениям в функционировании литоральных экосистем, а в некоторых случаях к полному исчезновению литоральных сообществ организмов. Выпадение такого важного структурно-функционального элемента из экосистемы озера приводит к изменениям циклов биогенных элементов, сокращению нерестовых площадей, исчезновению многих литоральных организмов, в том числе и кормовых объектов для ценных представителей ихтиофауны – нарушаются условия для естественного воспроизводства рыб, в первую очередь сиговых и лососевых. Кроме того, рыбные запасы подрывает осушение донной икры, уничтожение ее льдами или гибель при попадании на глубокие заиленные участки, что вызвано искусственным регулированием режима стока, несинхронизированного с природными сезонными циклами и естественной ритмикой гидробионтов.

Не менее важна проблема ухудшения качества водных ресурсов в результате интенсивного эвтрофирования вод, что является прямым следствием целого ряда трансформирующих факторов.

Во-первых, долговременное поступление во внутренние водоемы сточных вод, содержащих биогенные элементы (в первую очередь нитраты и фосфаты), сказалось на процессах образования первичной продукции фотоавтотрофами – водорослями, мохообразными и высшими цветковыми растениями: не типичное для олиготрофных вод обогащение доступными элементами питания вызвало увеличение биомассы отдельных представителей фитопланктона и фитоперифитона, появление новых, нетипичных для региона видов.

Во-вторых, глобальные и региональные климатические изменения в сторону более мягкого, океанического климата многократно усиливают развитие процессов эвтрофирования, что проявляется в нетипичном для региона массовом развитии водорослей и цианопрокариот в летний период.

В-третьих, произошло изменение экосистемных процессов передачи биогенных элементов по трофическим цепям и их утилизации: массовое и непродолжительное развитие водорослей и цианопрокариот с их последующим отмиранием и быстрым разложением возвращает биогенные элементы в водную среду в доступной для альгоценозов форме, что может повлечь за собой новую, повторную вспышку биомассы. При таком коротком цикле биогенные элементы не выводятся из экосистемы и лишь незначительная их часть идет на формирование биомассы более высоких трофических уровней. Токсичные сине-зеленые водоросли, способные вызывать цветение воды в водоемах высоких широт (*Dolichospermum lemmermannii* (Ricter) Wack., Hoff. & Komárek; *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault; *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. и др.), практически лишены естественных потребителей и оказывают негативное влияние на развитие других гидробионтов в зонах «цветения». Цианотоксины, выделяемые при массовом развитии сине-зеленых водорослей, а также резкое снижение кислорода и прозрачности воды в последние годы приводят к массовой гибели молоди рыб, включая и ценные промысловые виды.

Прямым следствием массового развития водорослей и цианопрокариот при эвтрофировании является продукция большого количества органического вещества, на разложение которого расходуется большое количество кислорода, что вызывает смену оптимального для арктических и субарктических гидробионтов кислородного режима на бескислородный в придонных слоях воды и донных отложениях. Дефицит кислорода вызывает заморные явления, опасные для гидробионтов, создает восстановительную геохимическую обстановку в придонных слоях воды и донных отложениях, что провоцирует здесь повышение концентраций железа и марганца, а также многих микроэлементов, накопленных на поверхности окислов и гидроокислов железа и марганца, в результате их перехода из донных отложений из нерастворенной формы в растворенную. Поэтому гидробионты при эвтрофировании подвергаются двойному удару – дефициту необходимого для их развития кислорода и повышению содержания токсичных микроэлементов, в первую очередь тяжелых металлов.

Значительные колебания уровня воды, не согласующиеся с естественной сезонной динамикой, являются дестабилизирующим фактором состояния пресноводных экосистем, а изменения климата могут оказать синергетический эффект на эти процессы и вызвать драматические последствия.

К настоящему времени накоплен большой массив гидрохимических и гидробиологических данных, требующий осмысления в аспектах наиболее общих, глобальных преобразований климатической системы региона и прогноза возможных последствий этих процессов для уникальных арктических водных ресурсов. Очевидно, что для решения проблем обеспечения региона качественными водными ресурсами в настоящее время нельзя ограничиваться мониторинговыми наблюдениями, а необходимо разрабатывать и внедрять комплекс научно обусловленных мероприятий по управлению водными ресурсами арктических территорий, включая разработку рекомендаций по водопользованию, водопотреблению и организации гидрологического режима на водных объектах с искусственно регулируемым стоком.

**3. Современные подходы к биоиндикации арктических водоемов.** Сообщества водорослей и цианопрокариот (альгоценозы) формируют основу трофических сетей и относятся к наиболее показательным биоиндикаторам долговременного и многофакторного воздействия на водные экосистемы, включая изменение климата, промышленное загрязнение и нарушение естественных геолого-гидрохимических циклов. Исследования альгоценозов являются неотъемлемой составляющей комплексного экологического мониторинга водоемов. Состояние альгоценозов (водорослей и цианопрокариот) является важнейшим показателем экологической обстановки и качества среды в целом и представляет собой наиболее информативный маркер стабильности экосистем.

Пресноводные альгоценозы Арктики крайне чувствительны ко всем изменениям факторов среды, включая динамику климатической системы и антропогенную нагрузку [Кашулин и др., 2018; Sharov, Denisov, 2021]. Альгоценозы находятся в самом начале цепей питания, определяя структурно-функциональную организацию всей экосистемы. Водоросли и цианопрокариоты тесно связаны с гидрохимическими, температурными, гидродинамическими и климатическими факторами, их видовой состав четко отражает условия окружающей среды. Они также способны сами влиять на химический состав вод, особенно при массовом развитии; доминирующие в составе альгоценозов виды зачастую определяют ход различных круговоротов вещества и энергии в водной экосистеме, вносят вклад в процессы самоочищения водоемов. Было показано [Денисов, Кашулин, 2016; Sharov, Denisov, 2021], что отдельные представители водорослей водоемов Евро-Арктического региона обладают мощным потенциалом к массовому развитию при возникновении благоприятных условий, например, при сочетании антропогенного эвтрофирования и потепления климата, что необходимо учитывать при экологических мониторинговых исследованиях и оценке качества вод.

Исторически облик альгофлоры арктических водоемов характеризовался преобладанием диатомовых и золотистых водорослей, значительную долю составляли харовые (десмидиевые). В последние десятилетия для некоторых водных экосистем наметилась тенденция доминирования зеленых водорослей и цианобактерий, а также периодического массового развития их отдельных представителей. Подобные процессы стали характерны не только для планктонных форм, но и для обрастателей: в Мурманской области было зафиксировано массовое развитие диатомовой водоросли *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) Schmidt [Sharov, Denisov, 2021]. Как правило, формирование мощных водорослевых матов *D. geminata* способствует снижению ресурсного потенциала поверхностных вод вследствие трансформации грунтов, радикальных изменений структурно-функциональных характеристик водных экосистем, ухудшения условий нереста ценных промысловых сиговых и лососевых видов рыб и уменьшения их рекреационной привлекательности.

Разработка и совершенствование систем биоиндикации на основе альгоценозов становятся особенно актуальными в связи с мощным развитием промышленности и дальнейшим освоением стратегических ресурсов Арктической зоны РФ. В этой связи перспективными представляются исследования водорослевых сообществ, развивающихся в условиях мощной техногенной нагрузки. Фитопланктон малых субарктических водоемов в импактной зоне металлургических предприятий – уникальный модельный объект для анализа экологических последствий техногенного загрязнения пресных вод. В отличие от химико-аналитических методов, требующих, наряду со сложным

оборудованием, проведения систематического мониторинга качества вод, биоиндикация на основе альгоценозов позволяет получить быструю, комплексную, интегральную оценку в виде непосредственного отклика биоты на условия окружающей среды.

На примере малых озер, расположенных в зоне влияния медно-никелевого комбината, было показано, что одним из факторов устойчивости планктонных организмов к токсической нагрузке следует считать избыток биогенных элементов. При этом экстремальные концентрации токсикантов замедляют процессы эвтрофирования, что демонстрирует низкий трофический статус озер по показателям фитопланктона [Денисов и др., 2018]. Для оценки условий обитания фитопланктона водных объектов в зоне воздействия медно-никелевого комбината был рассчитан комплексный коэффициент, связывающий две группы наиболее значимых факторов – антропогенное эвтрофирование и токсическое воздействие тяжелых металлов (ТМ):

$$K\ (Met/P) = \frac{\text{концентрация } Cd + Pb}{\text{концентрация } P_{\text{общ.}}}.$$

В основу этого соотношения легло предположение о том, что одним из факторов устойчивости планктона к токсической нагрузке можно считать наличие избытка биогенных элементов [Денисов, 2019]. Для расчета были выбраны наиболее токсичные ТМ – кадмий и свинец, концентрации которых в водах исследуемых озер многократно превышают фоновые показатели, а также содержание общего фосфора как показатель уровня эвтрофикации вод.

Для фитопланктона изученных озер характерно различное сочетание трофической и токсической нагрузки, что затрудняет поиск общих закономерностей на фоне высокой вариабельности батиметрических, гидрологических, ландшафтно-географических и других условий. Достоверных зависимостей показателей фитопланктона от гидрохимических характеристик, включая содержание биогенных элементов и концентрацию ТМ, выявлено не было. Использование коэффициента *K (Met/P)* позволяет с определенной долей условности проанализировать комплексное воздействие как трофической, так и токсической нагрузки на альгоценозы. Так, выявлена связь *K (Met/P)* с некоторыми показателями фитопланктона – таксономическим разнообразием, выраженным числом видов и уровнем биомассы (рис. 4).

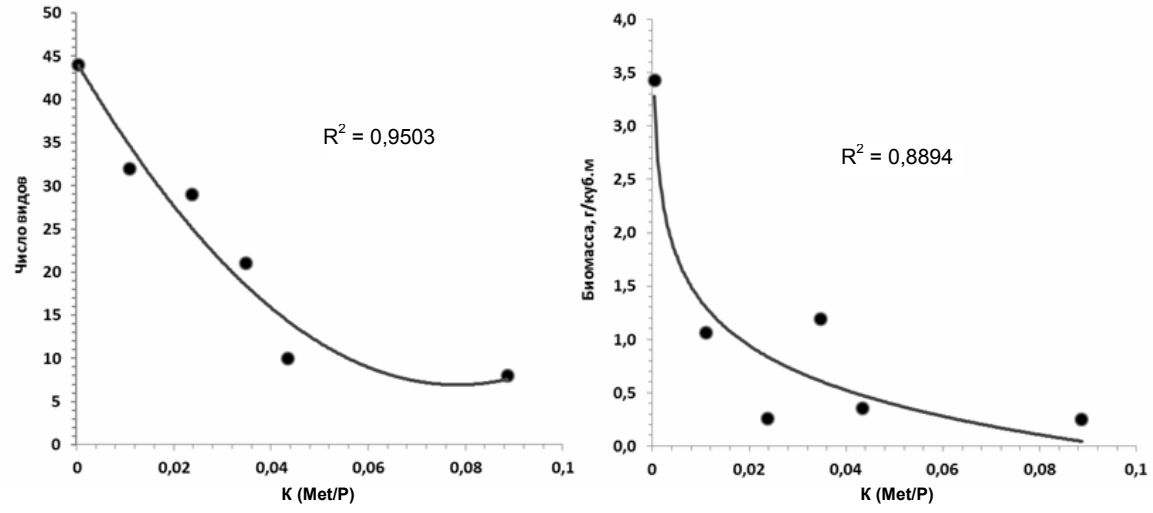



**Рис. 4.** Зависимость числа видов и биомассы фитопланктона от показателя соотношения концентрации металлов (Cd и Pb, мкг/л) к содержанию общего фосфора (мкг/л) в водных объектах в зоне влияния медно-никелевого комбината

**Fig. 4.** Dependence of phytoplankton species number and biomass on the ratio of metal concentration (Cd and Pb, μg/L) to total phosphorus content (μg/L) in waters affected by copper-nickel smelter

Токсичные тяжелые металлы (Cd и Pb) угнетают фотосинтетическую активность фитопланктона, в то время как биогенные элементы, напротив, способствуют интенсификации фотосинтеза. Таким образом, водорослевые сообщества, развивающиеся в условиях достаточного количества

и (или) избытка биогенных элементов, способны активнее противостоять токсической нагрузке. Полученное таким образом значение K(Met/P) позволяет оценить качество вод и состояние экосистем исследованных водных объектов, которые характеризуются различным соотношением токсической и трофической нагрузки. Полученные результаты отражают целесообразность взаимной верификации данных, полученных с помощью биоиндикации и аналитической химии водной среды, а также иллюстрируют нелинейность процессов, происходящих даже в сравнительно простых экосистемах малых озер.

Еще одним следствием токсического загрязнения тяжелыми металлами может стать изменение значений комплексных показателей, например, традиционно используемого индекса сапробности (*S*). Например, в рамках реализации программ мониторинга состояния окружающей среды при проведении инженерно-экологических изысканий, процедуры ОВОС и др., для оценки качества вод по гидробиологическим показателям используются нормативы, закрепленные ГОСТ 17.1.3.07-82. Согласно этому документу, индекс *S* рекомендован для определения качества вод и степени их загрязнения (рис. 5).

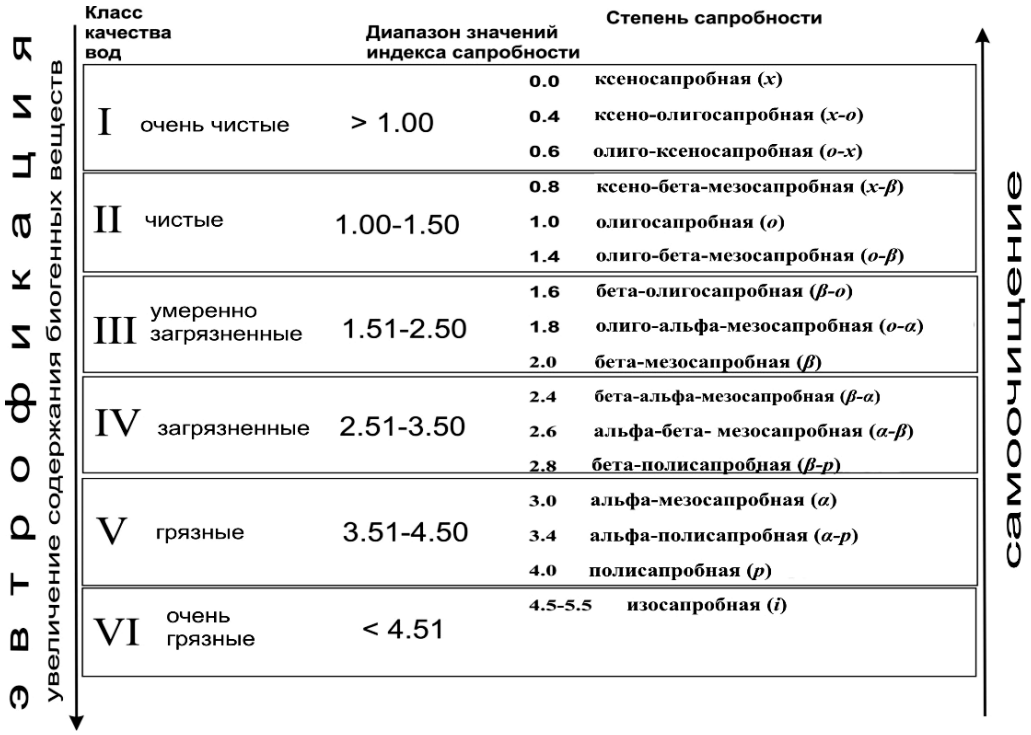



**Рис. 5.** Классификация качества вод и соответствующие степени сапробности, характеризующие процессы эвтрофикации и самоочищения

**Fig. 5.** Water quality classification and the matching saprobity levels characteristic of eutrophication and self-purification processes

По опыту исследования водоемов, развивающихся под воздействием сложного комплекса факторов, сочетающих эвтрофирование и токсическую нагрузку, можно утверждать, что индексы сапробности, рассчитанные по водорослевым сообществам, могут принимать сравнительно низкие значения (0,8–1,5) даже в непосредственной близости от источников доступных биогенных элементов, например, городских очистных сооружений. Таксономическая структура фитопланктона в таких условиях кардинально отличается от типичной для арктических вод [Denisov et al., 2020]. Видовой состав может быть сильно трансформирован и обеднен, что влечет за собой две основные проблемы.

Во-первых, количество таксонов организмов-сапробионтов может оказаться недостаточным для расчета индекса *S* и во-вторых, даже если сапробионтов хватает для вычислений, показатель может быть намного ниже ожидаемого исходя из концентрации биогенных элементов. В последнем

случае оценка качества вод по ГОСТ 17.1.3.07-82 может привести к неверным результатам, согласно которым анализируемые воды могут быть отнесены к неадекватно высокому классу. Проф. С. С. Бариновой [2018] было показано, что нитратный азот исчерпывается фотоавтотрофами полностью, если процессу фотосинтеза не препятствует присутствие токсических соединений. Поэтому если количество нитратного азота не соответствует индексу *S*, можно предполагать наличие токсической нагрузки, препятствующей фотосинтезу. Таким образом, индекс сапробности *S* может быть использован не только как традиционный показатель биогенного загрязнения, но и как индикатор токсической нагрузки.

На примере группы эвтрофированных водоемов Мурманской области было показано, что при сходной трофической нагрузке наличие высокого содержания тяжелых металлов (Ni и Cu) в воде занижает индекс *S*, рассчитанный по фитопланктону, в среднем почти в три раза (рис. 6). Поэтому использование индекса *S* для оценки качества вод в условиях загрязнения предприятиями цветной металлургии должно производиться с учетом наличия токсической нагрузки, которая существенно занижает расчетные значения; при этом *S* может выступать в качестве косвенного индикатора факта токсического воздействия на альгоценозы.

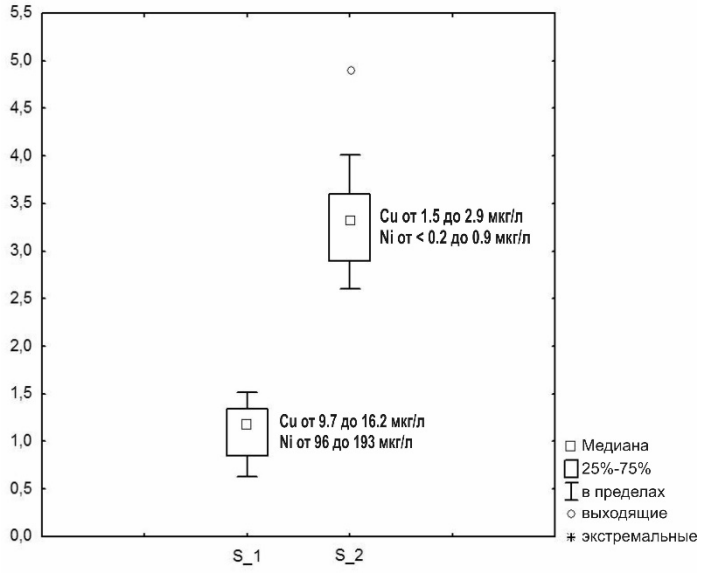



**Рис. 6.** Значения индекса сапробности, рассчитанного по фитопланктону, для некоторых водоемов Мурманской области, испытывающих антропогенное эвтрофирование при различной нагрузке тяжелыми металлами (Cu, Ni): S_1 – высокие концентрации (губа Монче оз. Имандра, оз. Куэтсъярви), S_2 – условно фоновые (оз. Ковдор, оз. Большой Вудъявр)

**Fig. 6.** Phytoplankton-inferred saprobity index for some water bodies of the Murmansk Region with ongoing anthropogenic eutrophication under various heavy metal loads (Cu, Ni): S_1 – high concentrations (Monche Bay, Lake Imandra, Lake Kuetsjärvi), S_2 – background (Lake Kovdor, Lake Bolshoy Vudyavr)

Важнейшим биологическим критерием состояния водных экосистем является содержание хлорофилла *«a»* (Chl *«a»*) в планктоне. Он используется при определении трофического статуса, служит показателем физиологического состояния водорослей и позволяет оценить их продукционный потенциал. Количественные показатели Chl *«a»* дают возможность оценить состояние первого трофического уровня водных экосистем и степень трансформации водоема под влиянием антропогенных факторов. Исследования концентрации Chl *«a»* в арктических регионах зачастую являются единственным источником достоверной информации о развитии и функционировании водорослевых сообществ в условиях непродолжительного периода вегетации. Учет этого показателя необходим для адекватной оценки качества вод при реализации программ комплексного экологического мониторинга городской среды [Денисов и др., 2020]. Многолетний опыт изучения арктических водоемов показал, что для адекватной оценки трофического статуса вод озер АЗРФ целесообразно применять шкалу, предложенную С. П. Китаевым [2007].

На примере 19 озер урбанизированных территорий Мурманской области показана значимость изучения содержания Chl *«a»* в оценке качества вод. Для некоторых озер были выявлены экстремально высокие для арктических вод значения (рис. 7). Максимальные концентрации оказались характерны для водоемов г. Мурманска, расположенных непосредственно в городской черте: Семеновское и Ледовое – 8,1 и 45,3 мг/м$^3$; минимальные – для озер в районе пгт Никель: LN2 и LN3 – 0,7 и 0,3 мг/м$^3$ соответственно.

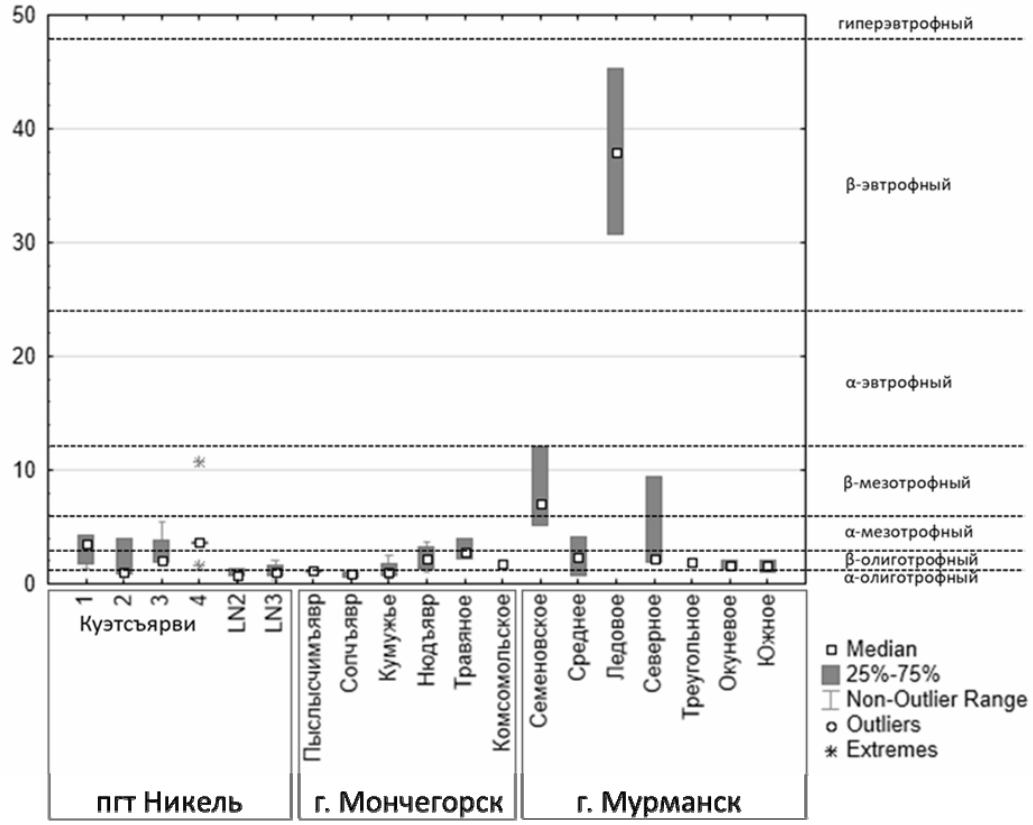



**Рис. 7.** Содержание хлорофилла *«a»* (мг/л) в планктоне озер урбанизированных территорий Мурманской области (2016–2019) и трофический статус вод согласно шкале С. П. Китаева [2007]

**Fig. 7.** Planktic chlorophyll *"a"* content (mg/l) in urban lakes of the Murmansk Region (2016–2019), and water trophic status, scale suggested by S. P. Kitaev [2007]

Экстремально высокие концентрации Chl *«a»* объясняются наличием в воде биогенных элементов в количествах, многократно превышающих фоновые значения, при сравнительно низкой концентрации тяжелых металлов. В таких условиях формируются специфические, не типичные для арктических пресноводных экосистем высокопродуктивные сообщества фитопланктона, способные активно развиваться в летний период.

Фоновыми значениями среднего содержания Chl *«a»* для озер Кольского полуострова считается 0,2–0,3 мг/м$^3$ [Никулина, 1975]. Во всех исследованных озерах этот показатель оказался на порядок выше. Трофический статус вод, оцениваемый по среднему содержанию Chl *«a»,* в планктоне большинства исследованных озер не превышает β-олиготрофного, даже для водоемов, где высока концентрация биогенных элементов. Это объясняется значительным уровнем загрязнения вод тяжелыми металлами, ингибирующими фотосинтетические процессы, при этом наиболее доступные водорослям соединения азота в виде нитратов не утилизируются фитопланктоном [Баринова, 2018].

Традиционным инструментом биоиндикации качества высокоширотных водоемов выступают диатомовые водоросли, для которых суровые климатические условия не являются препятствием для активной жизнедеятельности, а также в силу их широкой распространенности и высокой чувствительности к изменению всех факторов среды. В большинстве водных объектов арктических регионов они доминируют по численности, биомассе и таксономическому разнообразию. Кроме того, индикация качества вод на основе диатомовых водорослей в настоящее время наиболее проработана, поскольку имеется сравнительно крупный массив данных об экологической толерантности различных таксонов.

Использование живых альгоценозов в оценке состояния экосистем пресных вод Евро-Арктического региона сопряжено с рядом трудностей. Одной из них является короткое «гидробиологическое лето», на протяжении которого зачастую происходит резкая смена температурного и гидрологического режимов, меняется период наступления ледостава и половодья. При этом периоды формирования стабильных в таксономическом и количественном отношении альгоценозов могут существенно различаться, что делает выбор оптимального периода отбора проб сложной задачей. Также весьма проблематична организация масштабной гидробиологической съемки в пределах одного крупного водного объекта (или водосборной территории), синхронизированной по времени для обеспечения возможности сравнительного анализа результатов.

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование диатомовых комплексов (ДК) поверхностных слоев донных отложений (ДО) водоемов, содержащих интегральную информацию о видовом составе и структуре диатомовых сообществ за последние годы, что позволяет корректно провести сравнительный анализ состояния водной среды в различных участках акватории [Денисов, Косова, 2018; Вокуева, Денисов, 2020].

На примере крупного арктического водоема – оз. Имандра были показаны преимущества использования этого метода биоиндикации качества вод. Так, рассчитанный по ДК индекс видового разнообразия Шеннона-Уивера (H’) в различных участках акватории водоема характеризуется значительной вариабельностью (от 2,5 до 4,5 бит/экз.), что свидетельствует о широком спектре условий для развития водорослей. Максимальные значения индекса характерны для участков, где сочетаются речные и озерные условия – заливы, куда открываются устья рек и где развивается высшая водная растительность, что обогащает диатомовые комплексы эпифитными и бентосными видами. А наименьшие показатели H’ наблюдаются в том числе в районах эвтрофируемых и загрязняемых участков (рис. 8, а).

Степень антропогенной трансформации хорошо прослеживается и по распределению рассчитанных по ДК значений pH и индекса *S*. Наибольшие показатели pH (7,4–7,5) и индекса сапробности (1,8–1,9) наблюдаются в зоне влияния щелочных вод апатитового производства, обогащенных биогенными элементами (рис. 8, б, в). Аналогично сравнительно высокие показатели pH и индекса *S* отмечаются также в участках акватории, подверженных влиянию предприятий цветной металлургии, что также отражает развитие процессов эвтрофирования в этих участках акватории.

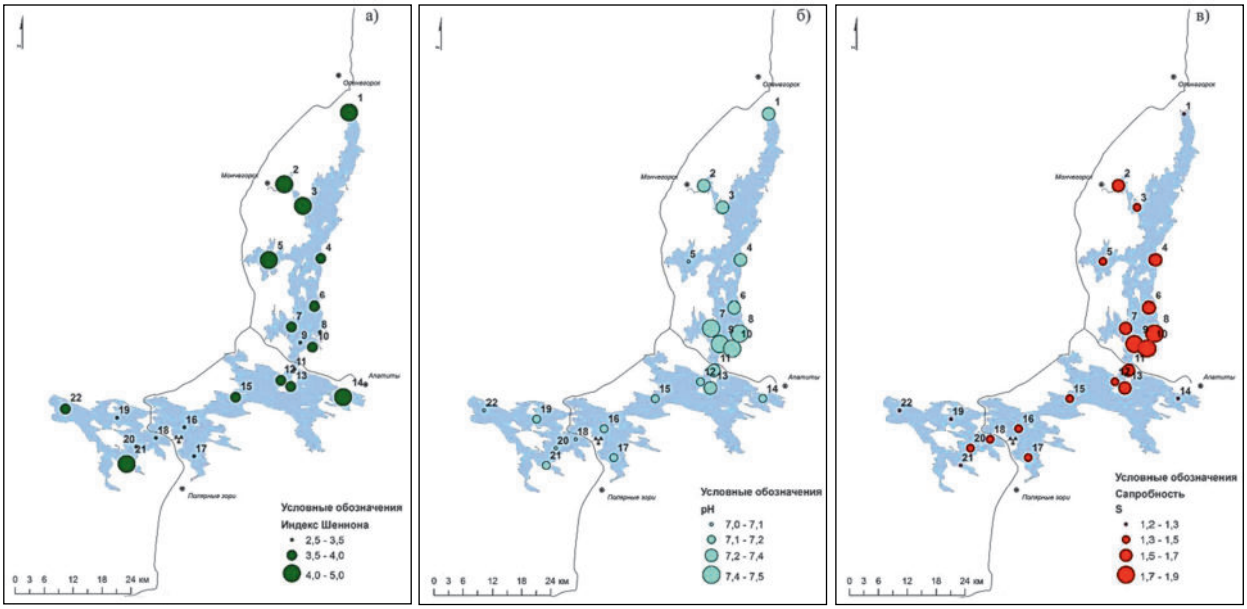



**Рис. 8.** Распределение вычисленных по диатомовым комплексам значений: а) индекса Шеннона-Уивера (бит/экз.); б) pH; в) индекса сапробности *S* на карте озера

**Fig. 8.** Distribution of diatom-inferred values: a) Shannon-Weaver index (bit/ind.); б) pH; в) saprobity index *S* on the lake map

Полученные по ДК результаты хорошо подтверждаются данными гидрохимического анализа. Среднее содержание фосфатов в воде эвтрофируемых участков оз. Имандра составляет более 3,0 мкгР/л, при концентрации фосфора в ДО более 9000 мкг/г; в условно фоновых участках среднее содержание фосфатов в воде – менее 1,0 мкгР/л, а концентрация фосфора в ДО – менее 3000 мкг/г.

Распределение относительной численности массовых видов диатомей позволило выделить виды-индикаторы конкретных условий, как олиготрофных, так и эвтрофных, по содержанию которых также можно определить степень антропогенной трансформации водоема в отдельных его участках. Наибольшая доля эвтрофных видов (*Aulacoseira granulata, A. islandica, Cyclostephanos dubius, Stephanodiscus alpinus, S. minutulus и S. neoastraea*) наблюдается в зоне загрязнения (рис. 9, а, б). Кроме того, разновидности *Stephanodiscus* характеризуются отдельно как индикатор токсической нагрузки: их относительная численность минимальна в зоне влияния стоков цветной металлургии, наряду с высокой долей остальных эвтрофных видов. Олиготрофные же виды (*Aulacoseira alpigena, Cyclotella radiosa, Pantocsekiella comensis, P. rossii*) многочисленны в слабо трансформированных антропогенной деятельностью участках акватории (рис. 9, в). Выделенные диатомеи-индикаторы могут быть использованы для задач регионального мониторинга и оценки качества крупных арктических озер, а также при разработке региональных систем нормирования антропогенной нагрузки.

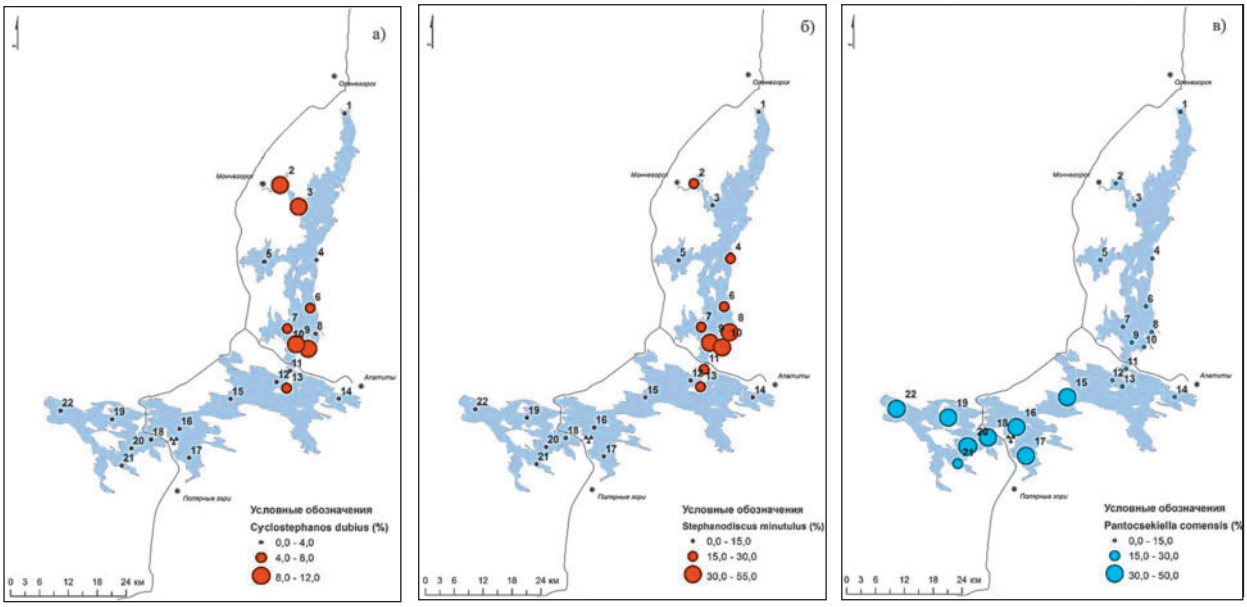



**Рис. 9.** Относительная численность (%) видов диатомей-индикаторов: а), б) загрязненных, в) незагрязненных вод

**Fig. 9.** Relative numbers (%) of indicator diatom species: а), б) polluted, в) unpolluted waters

Эффективность данного подхода подтвердилась при сравнении ДК современных седиментов с так называемыми «доиндустриальными». На примере десяти разнотипных озер Печенгского района Мурманской области, различающихся по степени загрязнения выбросами медно-никелевого комбината «Печенганикель», было показано, что современное видовое богатство диатомей (число таксонов рангом ниже рода) определяется интенсивностью загрязнения озер приоритетными загрязнителями региона – тяжелыми металлами Cu, Ni, Cd, а также общей степенью загрязнения [Денисов, Косова, 2018].

Сообщества зоопланктона также могут быть с успехом использованы для задач оценки качества среды арктических водоемов. Зоопланктон – это неотъемлемый компонент водных экосистем, тесно связан со всеми остальными звеньями биоты, служит одной из важнейших составляющих кормовой базы рыб, играет значительную роль в определении рыбопродуктивности водоемов. Озера высоких широт – зачастую водоемы планктонного типа, т. е. основные потоки

органического вещества и энергии от продуцентов к высшим трофическим звеньям идут через сообщества простейших, коловраток и ракообразных. Занимая промежуточное положение между бактерио-, фитопланктоном, бентосом и рыбами, зоопланктон играет важную роль в определении ресурсного потенциала озера. Для северных водоемов характерно преобладание стенобионтных видов, требовательных к качеству вод, что определяет повышенную чувствительность к техногенным воздействиям зоопланктонных сообществ в целом.

Наряду с этим комплексный многофакторный характер антропогенной нагрузки на арктические озера затрудняет выявление специфических показателей зоопланктона как биоиндикатора влияния на водоем отдельных факторов (изменения климата, техногенное загрязнение, эвтрофирование и др.), что обусловливает актуальность поиска из числа типологических показателей наиболее информативных. Современные сообщества планктона – результат длительного воздействия комплекса факторов, как многолетних изменений абиотической среды, так и соотношений между самими сообществами организмов.

Таксономическая структура зоопланктонного сообщества является хорошим индикатором степени загрязнения водоема в целом или его отдельных участков. Структурные перестройки зоопланктона в наиболее загрязненных озерах проявляются в снижении, а в ряде случаев исчезновении наиболее чувствительных к ухудшению экологических условий реликтов и типичных представителей фауны олиготрофных озер (*Leptodora kindtii*, *Bythotrephe slongimanus*, *Eudiaptomus gracilis*, *Heterocope appendiculata*). Их замещают и постепенно формируют состав руководящего комплекса эврибионтные виды с простыми жизненными циклами и высокой скоростью размножения, типичные представители северного ротаторного планктонного комплекса – коловратки (*Asplanchna priodonta, Keratella quadrata, Kellicottia longispina*), что свидетельствует об ухудшении самоочистительной способности данных районов озера.

С удалением от источников интенсивного антропогенного воздействия отмечен рост эвритропных организмов, отличающихся широкой экологической валентностью, ценных в кормовом отношении «тонких» фильтраторов кладоцер (*Bosmina obtusirostris, Daphniaspp*.) и представителей северной фауны активных «грубых» фильтраторов копепод (*Eudiaptomus gracilis, Heterocope appendiculata*) [Вандыш, 2004; Вандыш и др., 2015; Черепанов и др., 2019]. В нарушенных сообществах зоопланктона отмечается уменьшение средней индивидуальной массы зоопланктера сообщества (B/N). Снижение индекса видового разнообразия Шеннона по численности (бит/экз.) происходит не только в результате сокращения числа видов в сообществе, но и за счет усиления доминантности отдельных видов и создания монокультур из устойчивых к загрязнению форм.

Благодаря выявленным видам-индикаторам можно получить информацию о типе водоема даже с неполным видовым составом зоопланктона. Виды-индикаторы степени сапробности могут быть использованы для определения трофического статуса водоема. Исследования озерного зоопланктона в течение длительного периода позволяют выделить виды-индикаторы трофического типа водоемов. На этапе изучения характеристик организации планктонного сообщества важно выделить доминирующие или структурообразующие виды.

Размерная структура сообществ зоопланктона – важнейший показатель качества среды. При анализе учитываются средние размеры особей популяции, слагающих сообщество, а также закономерности изменений их во времени, т. е. динамика размерной структуры, связанная с перестройкой размерно-возрастных групп в течение жизненного цикла.

Средний размер особей каждого вида есть специфическая величина, и виды различаются по ней в той же мере, как и по физиологическим признакам. Каждый вид имеет предел размерной изменчивости, и в зависимости от условий среднеразмерный интервал популяции и средние размеры особей могут «скользить» по размерной шкале вида [Методы экологических исследований…, 2019].

Средний размер (масса) особи для сообщества в целом ($\overline{w}$ = B/N) дает информацию о преобладании в нем определенных таксономических и размерных групп. Его можно также рассматривать как интегральный показатель, отражающий всю совокупность экологических условий, свойственных водоему определенного трофического типа.

С повышением трофического уровня водоемов наблюдается тенденция к уменьшению размеров ракообразных. Подобная закономерность отмечена и для коловраток. Замена крупных форм доминант на мелкие указывает на то, что озеро стало более эвтрофным (например, замена *Bosmina coregoni* на *Bosmina longirostris* – самый мелкий вид среди босмин).

С повышением трофического уровня озера происходит снижение средней индивидуальной массы тела зоопланктера для сообщества в целом. При эвтрофировании водоемов наблюдается редукция крупных форм Cladocera, обусловленная изменением трофических связей в планктонном сообществе. При повышении трофического уровня водоема уменьшается численность таких крупных форм Copepoda, как Limnocalanus и Eudiaptomus, и возрастает роль более мелких циклопов. В водоемах эвтрофного типа снижение индивидуальной массы связано и со значительным преобладанием в сообществе коловраток. Их огромная численность при небольшой биомассе резко уменьшает общий интегральный показатель $\bar{w}$ = B/N. По результатам ряда исследований разнотипных озер был сформулирован следующий вывод: в озерах с более высоким трофическим индексом увеличивается численность мелких форм, следовательно, уменьшается индивидуальная масса особей зоопланктеров в сообществе.

Неотъемлемой частью комплексных экологических исследований являются сообщества макрозообентоса. Бентосные беспозвоночные, являясь одним из основных элементов водных экосистем, участвуют в биогеохимическом круговороте многих элементов, в частности биогенов, кальция, кремния, тяжелых металлов и трансформации органического вещества в системе «толща воды – донные отложения», что обусловливает их значительную роль в процессах самоочищения вод, регулируют газовый режим и механический состав грунтов водных объектов [Балушкина, 1976; Макрушин, 1984; Методы биоиндикации…, 1989; Руководство…, 1992; Шитиков и др., 2003; Методы экологических исследований…, 2019]. Поэтому сообщества макрозообентоса являются ценным объектом биоиндикации.

В АЗРФ проходит северный предел распространения многих видов, однако в целом макрозообентос высокоширотных водоемов сравнительно богат в таксономическом отношении и включает практически все систематические группы, представленные в пресных водоемах. Так, бентосная и нектобентосная фауна Мурманской области насчитывает около 500 видов беспозвоночных организмов. Основу зообентоса составляют виды европейского, европейско-сибирского и палеарктического распространения, доля космополитов невелика (11 видов) [Яковлев, 2005].

В настоящее время в сообществах фоновых водоемов отмечено сокращение биоразнообразия и роли аборигенных видов, внедрение и расселение эврибионтных видов из умеренных широт. Вселенцы заселяют преимущественно мелководные участки водоемов, бентосные сообщества в зоне профундали более стабильны, их эти изменения затрагивают в меньшей степени. Помимо природных факторов, данные процессы могут быть обусловлены и антропогенным воздействием. В 2011 г. в сбросном канале Кольской АЭС (оз. Имандра) обнаружена популяция крупных двустворчатых моллюсков сем. Unionidae (р. Anodonta), которые в природных водоемах Мурманской области не обитают.

Усиление темпов эвтрофикации вод, обусловленное не только антропогенным воздействием, но и глобальными факторами, в том числе изменением климата в сторону потепления, приводит к росту количественных показателей донных биоценозов и повышению трофического статуса природных олиготрофных водоемов [Валькова, 2020].

В мировой и отечественной практике используется свыше 60 методов мониторинга экологического состояния водных объектов, включающих различные характеристики зообентоса [Баканов, 2000].

Индекс Ф. Вудивисса позволяет оценивать качество воды и степень ее загрязнения по присутствию в пробах индикаторных групп, значение которых определяется в биотических индексах по специальной таблице, индекс принимает значение от 0 до 10. Чем выше степень загрязнения, тем он меньше: индекс, равный 5 баллам и ниже, указывает на выраженное загрязнение [Руководство…, 1992]. При оценке состояния водных объектов следует учитывать, что применение этого индекса возможно лишь для водотоков и литорали озер.

На основе индекса Вудивисса В. А. Яковлевым [2005] разработан Кольский биотический индекс (КолБИ) (табл.). Его применение ограничено водотоками и прибрежной зоной озер и водохранилищ, расположенных на территории Северо-Запада России.

КолБИ для оценки качества вод в водотоках и на литорали водоемов Кольского Севера

Kola Biotic Index for water quality assessment in watercourses and littoral zones in the Kola North

| Группа/Group | Число групп / Number of groups | | |
|---|---|---|---|
| | 0–1 | 2–5 | ≥ 6 |
| Acanhtobdellidae, Mysidacea, Ephemerellidae, Ephemeridae, Heptageniidae, Potamanthidae, Siphlonuridae, Capniidae, Chloroperlidae, Perlidae, Perlodidae, Beraeidae, Brachycentridae, Goeridae, Lepidostomatidae, Mollanidae, Odontoceridae, Sericostomatidae | 8 | 9 | 10 |
| Lymnaeidae, Margaritiferidae, Physidae, Planorbidae, Valvatidae, Piscicolidae, Gammaridae, Haustoriidae, Beatidae, Caenidae, Leptophlebidae, Leuctridae, Taeniopterygidae, Aeshnidae, Corduliidae, Gomphidae, Lestidae, Libellulidae, Leptoceridae, Philopotamidae, Psychomyiidae | 6 | 7 | 8 |
| Sphaeride, Erpobdellidae, Glossiphonidae, Nemouridae, Coenagrionidae, Gerridae, Chrysomelidae, Dryopidae, Elminthidae, Gyrinidae, Haliplidae, Helodidae, Hydrobiidae, Hydrophilidae, Hydropsychidae, Hydroptilidae, Limnephilidae, Phryganeidae, Polycentropodidae, Rhyacophilidae, Ceratopogonidae, Liminiidae, Simulidae, Tipulidae | 4 | 5 | 6 |
| Lumbriculidae, Asellidae, Corixidae, Dytiscidae, Sialidae | 2 | 3 | 4 |
| Tubificidae, Chironomidae | 1 | 2 | – |

Олигохетный индекс Гуднайта и Уитли основан на учете соотношения численности олигохет к общей численности всех донных беспозвоночных. Индекс имеет следующие индикаторные показатели:

– хорошее состояние водного объекта – олигохет менее 60 % от общего числа всех донных организмов;

– умеренно загрязненное – олигохет 60–80 %;

– высокий уровень загрязнения – олигохет более 80 %.

Методика Гуднайта и Уитли эффективна только при оценке загрязнения органическими веществами, в случае загрязнения вод тяжелыми металлами, которые угнетают сообщество олигохет, индекс Гуднайта – Уитли имеет малую информативность [Яковлев, 2005].

Для оценки экологического состояния водных объектов Фенноскандии, подверженных сложному по составу загрязнению, В. А. Яковлевым предложен индекс сапротоксобности [2005]. Метод сочетает в себе известные подходы в системах сапробности и токсобности. Рассчитывается по формуле:

$$ST = \sum \frac{ST_i \cdot n_i}{n_i},$$

где $\sum (ST_i \cdot n_i)$ – сумма произведений значений индексов сапротоксобности отдельных видов на соответствующее им число особей; $n_i$ – число особей всех индикаторных видов.

Индекс сапротоксобности в олигосапротоксобной зоне равен 1,0–1,5, в β-мезосапротоксобной – 1,5–2,5, в α-мезосапротоксобной – 2,5–3,5, полисапротоксобной – 3,5–4,0. Как показала апробация системы сапротоксобности в условиях различных антропогенных воздействий, ее применение позволяет получить вполне надежную информацию о сложном по составу загрязнении вод в северных районах России. При оценке качества вод с помощью индекса сапробности *S* по показателям зообентоса необходимо учитывать тип субстрата, на котором произведен отбор проб. Для корректного сравнения данных, полученных для разных водных объектов, субстрат должен быть одинаковым.

**Заключение.** Актуальной задачей экологических исследований арктических водных экосистем представляется не только выявление причинно-следственных связей сокращения биологического разнообразия, но и оценка направленности сукцессии экосистем, их способности к поддержанию стабильности путем адаптивного преобразования живых систем в новых условиях. Объективно для понимания и прогнозирования происходящих процессов трансформации биоразнообразия необходима разработка новых методологических подходов к контролю состояния водных экосистем северных территорий, что позволит адекватно оценивать современное состояние

и качество среды обитания водного населения, условия реализации и диапазон пределов функционирования приспособительных механизмов на организменном и биоценотическом уровне. В этой связи особую актуальность вновь приобретают работы флористического и фаунистического направления, призванные описать современный таксономический состав и структуру сообществ гидробионтов, провести сравнительный исторический анализ, выявить долговременную динамику биоразнообразия.

Залогом успешной реализации биоиндикации качества вод является принцип комплексности. Для получения адекватной картины состояния водной экосистемы необходима взаимная верификация результатов, полученных по различным сообществам гидробионтов (планктон, бентос, перифитон, ихтиофауна), а также с помощью физико-химических методов анализа.

Широко развернувшиеся комплексные экологические исследования водоемов АЗРФ показали высокую эффективность биоиндикации при решении задач оценки качества вод и нормировании антропогенной нагрузки на водные ресурсы. Вместе с тем специфика арктических водоемов диктует необходимость обязательного учета таких факторов, как короткое гидробиологическое лето, малый безледный период, высокая вероятность значительных флуктуаций количественных показателей гидробионтов наряду с замедленными скоростями биогеохимических циклов. Анализ развития многофакторной системы, определяющей развитие водных объектов, осложняет современное потепление климата Арктики, моделирующее все процессы, включая и последствия антропогенной нагрузки. В последние десятилетия наблюдается значительная вариативность гидробиологических показателей, что проявляется во всех основных биотических составляющих водных экосистем. Поэтому в качестве наиболее информативных индикаторов условий формирования качества вод и состояния экосистемы целесообразно использовать интегральные показатели.

Разработка и совершенствование систем биоиндикации на основе сообществ гидробионтов становятся особенно актуальными в связи с мощным развитием промышленности и освоением стратегических ресурсов Арктической зоны РФ. В этой связи перспективными представляются исследования биотической составляющей экосистем, развивающихся в условиях мощной техногенной нагрузки, с целью анализа формирования адаптационных механизмов и перспектив восстановления нарушенных водоемов. Это приобретает определяющее значение для биоиндикации качества среды и задач гидроэкологического мониторинга, что особенно актуально для разработки адекватных систем управления и рационального использования водных ресурсов.

Многолетние комплексные исследования водоемов Баренцева / Евро-Арктического региона, выполненные Лабораторией водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН, позволили подобрать эффективный комплекс методов экологических исследований водоемов, хорошо зарекомендовавший себя в условиях Арктики [Методы экологических исследований…, 2019]. В то же время современные тенденции развития теории и практики экологической безопасности, сохранения и контроля биоразнообразия требуют разработки научных основ инвентаризации и оценки природных, в частности биологических, ресурсов пресных вод, оценки и прогноза дальнейшего развития под воздействием мощного комплекса антропогенных факторов и климатических изменений.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные факторы определяют условия формирования качества вод арктических водоемов?
2. Каковы преимущества биоиндикации по сравнению с другими методами контроля качества вод?
3. В чем заключаются особенности биоиндикации пресных вод арктических регионов?
4. Каковы современные проблемы биоиндикации внутренних водоемов высоких широт?
5. Какие перспективы развития региональных систем биоиндикации можно выделить?

*Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0045 (отбор проб и интерпретация результатов), а также поддержана грантами РНФ № 19-77-10007 (аналитические исследования) и РФФИ 18-05-60142 (обобщение мониторинговых данных).*

## Литература


*Баканов А. И.* Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 68–82.

*Балушкина Е. В.* Хирономиды как индикаторы степени загрязнения вод // Методы биологического анализа пресных вод. Л.: ЗИН, 1976. С. 106–118.

*Баринова С. С.* Проблема интегральной оценки токсического влияния на фотосинтетические организмы в водных экосистемах // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 1. С. 39–43.

*Баринова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В.* Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.

*Валькова С. А.* Таксономический состав и структура макрозообентоса разнотипных водоемов Зеленого пояса Фенноскандии в пределах Мурманской области // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2020. № 1. С. 56–70.

*Вандыш О. И.* Зоопланктон как индикатор состояния озерных экосистем Кольского полуострова при действии стоков горно-промышленных предприятий // Экология. 2004. № 2. С. 134–140.

*Вандыш О. И., Черепанов А. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б.* Влияние стоков горнорудного производства на зоопланктонное сообщество губы Белой озера Имандра // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 48–62.

*Вокуева С. И., Денисов Д. Б.* Использование диатомовых комплексов поверхностных донных отложений для оценки современного состояния крупных арктических водоемов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 84–88.

ГОСТ 17.1.3.07-82. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.

*Денисов Д. Б.* Обзор некоторых критериев оценки биологического разнообразия // Математические исследования в естественных науках. Труды VIII Всероссийской научной школы. Апатиты, Геологический институт Кольского НЦ РАН, Кольское отделение РМО, 15–16 октября 2012 г. / ред. Ю. Л. Войтеховский. Апатиты: Изд-во K & M, 2012. С. 90–100.

*Денисов Д. Б.* Фитопланктон водоемов Мурманской области в зонах влияния металлургической промышленности // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2019. 4(10). Вып. 7. С. 94–107.

*Денисов Д. Б., Валькова С. А., Даувальтер В. А., Королева И. М., Разумовская А. В., Терентьев А. В., Зубова Е. М., Вандыш О. И., Сандимиров С. С., Слуковский З. И.* Лимнологические исследования института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 6, № 11. С. 68–85.

*Денисов Д. Б., Валькова С. А., Терентьев П. М., Черепанов А. А., Разумовская А. В.* Экологическая характеристика малых озер в зоне деятельности Мончегорской площадки АО «Кольская ГМК» // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология и океанология. 2018. № 9. С. 65–76.

*Денисов Д. Б., Кашулин Н. А.* Цианопрокариоты в составе планктона оз. Имандра (Кольский полуостров) // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Апатиты, 2016. Вып. 4, № 7(41). С. 40–56.

*Денисов Д. Б., Косова А. Л.* Диатомовые водоросли в оценке качества вод озерно-речной системы Паз // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 449–452.

*Денисов Д. Б., Слуковский З. И., Косова А. Л.* Содержание хлорофилла *«а»* в планктоне озер урбанизированных территорий Мурманской области // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 163–167.

*Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Кашулин А. Н., Зубова Е. М., Королева И. М., Косова А. Л., Черепанов А. А.* Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2018. Т. 9, вып. 6. С. 34–86.

*Китаев С. П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 394 с.

*Комулайнен С. Ф.* Методические рекомендации по изучению фитоперифитона в малых реках. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 43 с.

*Макрушин А. В.* Биологический анализ качества вод. Л.: ЗИН, 1974. 60 с.

Методы биоиндикации и биотестирования природных вод. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. Вып. 2. 277 с.

Методы биоиндикации: учебно-методическое пособие / М. Н. Мукминов, Э. А. Шуралев. Казань: Казанский университет, 2011. 48 с.

Методы экологических исследований водоемов Арктики: монография / С. С. Сандимиров [и др.]. Мурманск: МГТУ, 2019. 180 с.

*Моисеенко Т. И.* Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.

*Никулина В. Н.* Фитопланктон // Биологическая продуктивность северных озер. В 2-х ч. Ч. 2. Озера Зеленецкое и Акулькино. Л.: Наука, 1975. С. 37–52.

*Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.

*Розенберг Г. С.* Информационный индекс и разнообразие: Больцман, Котельников, Шеннон, Уивер…// Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2010. Т. 19, № 2. С. 4–25.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / ред. В. А. Абакумов. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 239 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / В. А. Абакумов [и др.]. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 318 с.

*Семенченко В. П.* Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Мн.: Орех, 2004. 125 с.

*Черепанов А. А., Денисов Д. Б., Слуковский З. И., Вандыш О. И., Постнова С. В.* Исследования сообществ зоопланктона озер города Мурманска // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. 4(10). Вып. 7. С. 83–93.

*Чуйко Г. М.* Биомаркеры в гидроэкотоксикологии: принципы, методы и методология, практика использования // Экологический мониторинг. Часть VIII. Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем: учебное пособие. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2014. С. 310–326.

*Чуйко Г. М., Томилина И. И., Холмогорова Н. В.* Комплексная оценка биоэкологических и химических систем: учеб. пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2018. 140 с.

*Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

*Шитиков В. К.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

*Яковлев В. А.* Пресноводный зообентос северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Апатиты: КНЦ РАН, 2005. Ч. 2. 145 с.

*Barinova S.* Empirical Model of the Functioning of Aquatic Ecosystems // Oceanography Aquaculture. 2017a. Vol. 1. P. 1–9.

*Barinova S.* On the classification of water quality from an ecological point of view // Envir. Sci. Nat. Res. 2017b. Vol. 2. P. 1–8.

*Barinova S.* Essential and practical bioindication methods and systems for the water quality assessment // Envir. Sci. Nat. Res. 2017c. Vol. 2. P. 1–11.

*Barinova S.* To the question of the relationship between the diversity index and the saprobity index in algae and invertebrates // Voprosy sovremennoi algologii (Issues of modern algology). 2020. № 2(23). P. 1–7. URL: http://algology.ru/1624

*Berger W. H., Parker F. L.* Diversity of Planktonic Foraminifera in Deep Sea Sediments // Science. 1970. Vol. 168. P. 1345–1347.

*Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L.* Small lakes ecosystems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk region) // Envir. 2020. 7(4). 29. P. 1–13.

*Kolkwitz R., Marsson M.* Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna. Mitt. a. d. Kgl. Prüfungsanst.f. Wasserversorg u. Abwässerbeseitigung zu Berlin, 1902. Vol. 1: 33–72.

*Kolkwitz R., Marsson M.* Ökologie der pflanzlichen Saprobien. In: Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, 1908. Band 261. S. 505–519.

*Kolkwitz R., Marsson M.* Ökologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologischen Gewässerbeurteilung. In: 'Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1909. Band 2. S. 126–152.

*Kumari D., Paul D. K.* Assessing the Role of Bioindicators in Freshwater Ecosystem // Interdisciplinary Cycle Research. 2020. Vol. XII, issue IX. P. 58–74.

*Manickavasagam S., Sudhan C., Bharathi, Aanand S.* Bioindicators in aquatic environment and their significance // Aqua Trop. 2019. Vol. 34, N 1. P. 73–79.

*Margalef R.* Information theory in ecology // Gen. Syst. 1958. N 3. P. 36–71.

*Markert B., Breure T., Zechmeister H.* (eds.). Bioindicators and biomonitors – principles, concepts and applications. Amsterdam: Elsevier, 2003. 997 p.

*Oertel N., Salánki J.* Biomonitoring and Bioindicators in Aquatic Ecosystems. In: Ambasht RS, Ambasht NK (eds.). Modern trends in applied aquatic ecology. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2003. P. 219–246.

*Protasov A., Barinova S., Novoselova T., Sylaieva A.* The Aquatic Organisms Diversity, Community Structure, and Environmental Conditions // Diversity. 2019. Vol. 11, N 10. P. 190. doi: https://doi.org/10.3390/d11100190.

*Shannon C. E., Weaver W.* The Mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.

*Sharov A., Denisov D.* Algae of lakes in the European North of Russia // Lake Water: Properties and Uses (Case studies of Hydrochemistry and Hydrobiology of lakes in Northwest Russia). Nova Science Publishers, 2021. P. 203–251.

*Simpson E. H.* Measurement of species diversity // Nature. 1949. 163: 688.

*Sládeček V.* System of water quality from biological point of view // Arch. Hydrobiol. Erg. Limnol. 1973. Vol. 7. P. 1–218.

*Zolkefli N., Sharuddin S. S., Yusoff M. Z. M., Hassan M. A., Maeda T., Ramli N.* A Review of Current and Emerging Approaches for Water Pollution Monitoring // Water. 2020. 12, 3417.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Денисов Дмитрий Борисович**
заведующий лаб. водных экосистем,
ведущий научный сотрудник, к.б.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: d.denisow@ksc.ru

## CONTRIBUTORS:

**Denisov, Dmitry**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Academgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: d.denisow@ksc.ru

УДК 597.2/.5(470.1/.2)

# ИХТИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРА

**П. М. Терентьев[1], Е. М. Зубова[1], И. М. Королёва[1], Н. А. Кашулин[1], А. В. Мелехин[2], Н. А. Бочкарёв[3]**

[1]*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия*
[2]*Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия*
[3]*Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы, касающиеся проведения ихтиологических исследований как неотъемлемой составляющей при оценке состояния пресноводных экосистем. Показана важность осуществления работ, проводимых на водоемах в условиях ледовой обстановки с соблюдением необходимых мер безопасности. Описаны основные подходы к установке орудий лова на водоемах в зимний период для отбора ихтиологического материала. Приведено описание основных этапов анализа пластических и меристических показателей рыб. Дана детальная последовательность процедуры использования цифровой фотографии в ходе морфологического анализа как одного из эффективных инструментов исследования. Большое внимание уделено рассмотрению ростовых процессов представителей рыбной части сообществ с применением методики расчисления темпов роста. Рассмотрены базовые моменты проведения патологоморфологического анализа показателей рыб, изучения особенностей их питания, а также использования в качестве индикаторов уровня антропогенной нагрузки на водоем (на примере накопления тяжелых металлов). Дано представление о методике изучения форменных элементов крови представителей ихтиофауны как показателей при морфофизиологических исследованиях, отражающих состояние организмов в ответ на изменения среды обитания. Приведены клинические гематологические показатели обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.) озер Мурманской области.

**Ключевые слова:** ихтиофауна; экологический мониторинг; морфофизиологические показатели; патологоморфологический анализ; гематологические параметры.

# ICHTHYOLOGICAL RESEARCH AS A COMPONENT OF NORTH FRESHWATER ECOSYSTEMS RESEARCH

**P. M. Terentjev[1], E. M. Zubova[1], I. M. Koroleva[1], N. A. Kashulin[1], A. V. Melekhin[2], N. A. Bochkarev[3]**

[1]*Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*
[2]*Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*
[3]*Institute of Systematics and Ecology of Animals (ISEA), Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

**Summary.** We explore issues related to ichthyological research as an integral part of freshwater ecosystem assessment. The importance of a safe organization of activities on ice-covered waters is highlighted. The main approaches to deploying fishing gear for ichthyological sampling in winter are demonstrated. Major stages in the analysis of morphometric and meristic parameters of fish are described. The procedure for using digital photography as an efficient tool in morphological analysis is related in detail. Much attention is given to the study of growth processes in members of fish communities through growth rate estimation. Fundamental tips are given regarding pathological morphological analysis of fish

parameters, the study of their dietary characteristics, and the use of anthropogenic load on the reservoir as an indicator (with heavy metals as the example). The reader is introduced to the technique of studying blood corpuscles in fish as indicators in morpho-physiological studies, reflecting the state of the organism in response to changes in the habitat. Clinical hematological parameters of the common whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) from lakes of the Murmansk Region are reported.

**Keywords:** fish fauna; environmental monitoring; morphophysiological indicators; pathological morphological analysis; hematological parameters.

**Тема лекции.** «Ихтиологические исследования пресноводных экосистем Севера».

**Цель.** Освещение основных подходов и принципов ихтиологических исследований пресноводных экосистем.

**Задачи.** Научиться использовать, наряду с традиционными в ихтиологии методами, возможности цифровой фотографии при изучении морфологических показателей рыб. Изучить особенности методики определения возраста рыб и процессы их линейного роста (на примере обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.)). Ознакомиться с основами методик патологоморфологического и гематологического анализа. Принимая во внимание направленность работы Школы, ориентированной на изучение водных экосистем в зимний период, освоить особенности проведения ихтиологических работ в условиях ледовой обстановки.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Отбор материала.
2. Обработка ихтиологического материала.
   - 2.1. Анализ основных показателей.
   - 2.2. Фоторегистрация морфологических данных у рыб.
   - 2.3. Определение возраста рыб и методика расчисления темпа линейного роста рыб на примере обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.) оз. Имандра.
   - 2.4. Метод патологоморфологического анализа состояния организма рыб.
   - 2.5. Основные подходы к гематологическому анализу.
   - 2.6. Изучение особенностей питания обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.).
   - 2.7. Отбор образцов органов и тканей обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.) для анализа тяжелых металлов.

Заключение.

## Изложение материала

**Введение.** Ихтиология – наука, изучающая строение и функции органов рыб, образ жизни на всех стадиях развития, распространение рыб во времени и пространстве, их систематику и эволюцию. При всей широте подходов к изучению особое значение имеет прикладной аспект использования различных ихтиологических показателей для оценки состояния пресноводных экосистем. Биоиндикационная роль представителей рыбной части сообществ водных экосистем широко известна [Лукьяненко, 1983; Куперман, 1992; Jones et al., 1997; Кашулин и др., 1999; Моисеенко, 2005; Немова, 2005; Amundsen et al., 2011; Hosseini et al., 2015]. Применительно к арктическим широтам оценка состояния пресноводных экосистем, наряду с данными гидрохимического и гидробиологического анализа на основе изучения рыб, является неотъемлемой частью экологического мониторинга.

Помимо традиционных в ихтиологии методов, большое значение уделено описанию возможностей использования цифровой фотографии при изучении морфологических показателей рыб. Рассмотрены особенности методики определения возраста рыб, изучения процессов их линейного роста (на примере обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.)), вопросы, касающиеся патологоморфологического и гематологического анализа. Работа Школы ориентирована на изучение водных экосистем в зимний период, и, соответственно, материалы раздела включают описание проведения ихтиологических работ в условиях ледовой обстановки.

**1. Отбор материала** *(П. М. Терентьев)*

Ихтиологические исследования в рамках комплексного подхода при оценке состояния водных экосистем проводятся с учетом анализа показателей на уровне организма, популяции и сообщества (рис. 1).

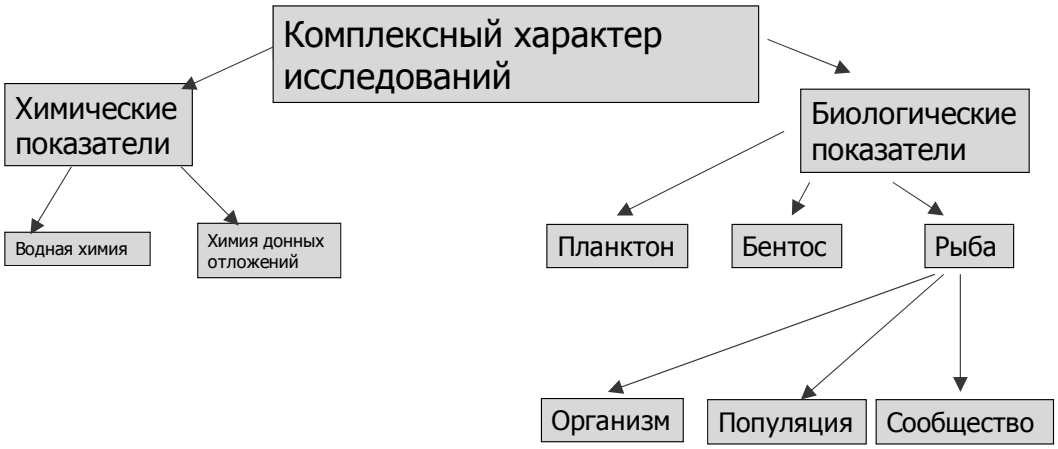



**Рис. 1.** Оценка состояния водных экосистем

**Fig. 1.** Freshwater ecosystem assessment

Ихтиологические исследования в зависимости от поставленных целей и задач могут проводиться на озерах, водохранилищах, реках и ручьях. Выявление видового состава ихтиофауны предполагает исследование обширной части акватории водоема. При этом должны быть изучены области литорали, придонные горизонты (профундаль) и толща воды (пелагиаль) (рис. 2).

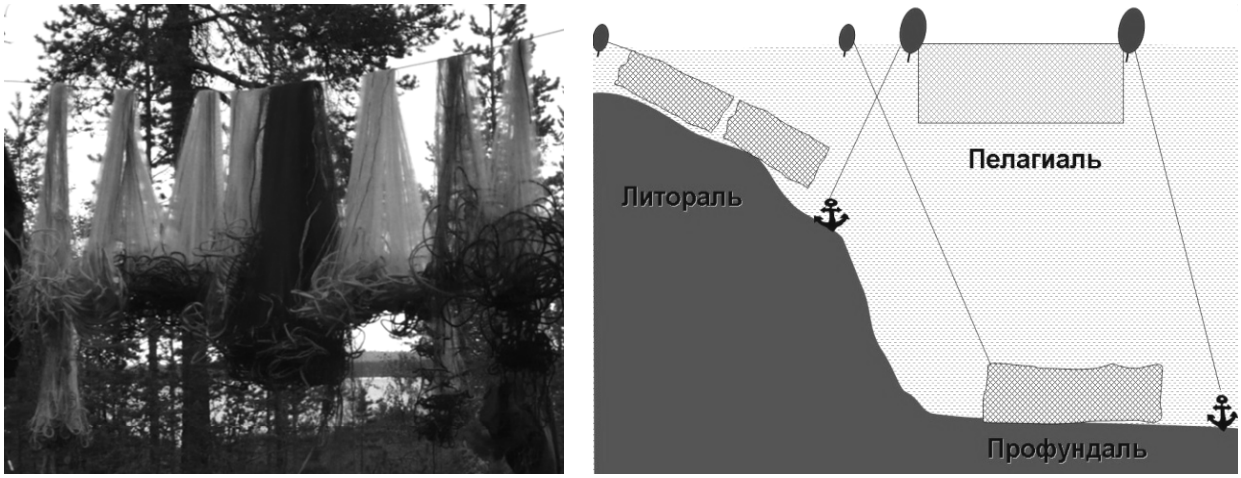



**Рис. 2.** Ставные сети, их установка и расположение в различных частях водоема

**Fig. 2.** Stake nets, installation and positioning in different lake parts

Изучение состояния рыбной части сообществ может проводиться круглогодично с учетом видовых особенностей рыб и биологических процессов, приуроченных к различным сезонам года. Как указывалось выше, изучение рыб в зимний период имеет ряд особенностей. Важнейшее значение при проведении исследований «со льда» имеет техника безопасности. Наиболее критичными при этом являются периоды ледостава (формирования льда на водоемах и водотоках), а также весна, когда под действием положительных температур, активного снеготаяния происходит ухудшение качеств льда (рис. 3).




**Рис. 3.** Безопасная толщина льда на водоемах для различных видов деятельности

**Fig. 3.** Safe ice thickness in water bodies for different activities

Постановка ставных сетей в зимний период затруднена вследствие устойчивого ледового покрова. Для их установки в настоящее время используется серия устройств (рис. 4).

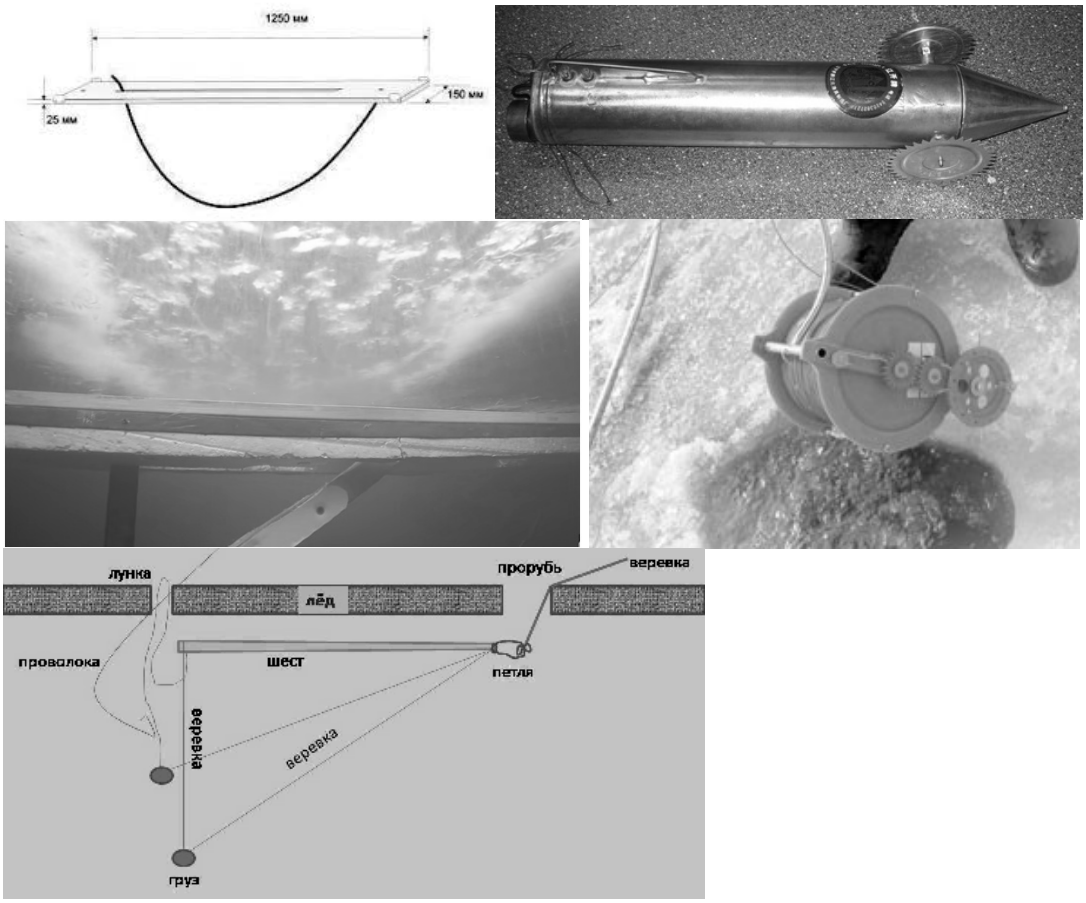



**Рис. 4.** Приспособления для установки сетей под лед

**Fig. 4.** Devices for deploying nets under ice

Задача указанных устройств – протянуть подо льдом шнур на необходимую длину. При этом между краями указанного отрезка ледовой поверхности подготавливаются полыньи (майны). В дальнейшем к концу протянутого шнура привязывается и устанавливается путем обратной

протяжки необходимая последовательность сетей. При проверке сетей процедура протяжки происходит в обратном порядке. В исследованиях используется набор сетей длиной 25 м и высотой 1,5 м с размерами ячеи: от 5 до 50 мм из нейлонового монофиламента. Это дает возможность вылавливать рыб всех возрастных групп.

## 2. Обработка ихтиологического материала

### 2.1. Анализ основных показателей *(П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, И. М. Королёва)*

Выловленную рыбу подвергают ихтиологической обработке, которая заключается в описании состояния основных показателей организмов рыб. Взвешивание производится с точностью до 1 г. Измерение длины осуществляется с помощью ихтиологической линейки. Определяется длина всей рыбы AB (абсолютная), длина по Смитту AC – расстояние от переднего края рыла до конца средних лучей C и длина без хвостового плавника или промысловая AD – расстояние от начала рыла до конца чешуйного покрова (рис. 5).

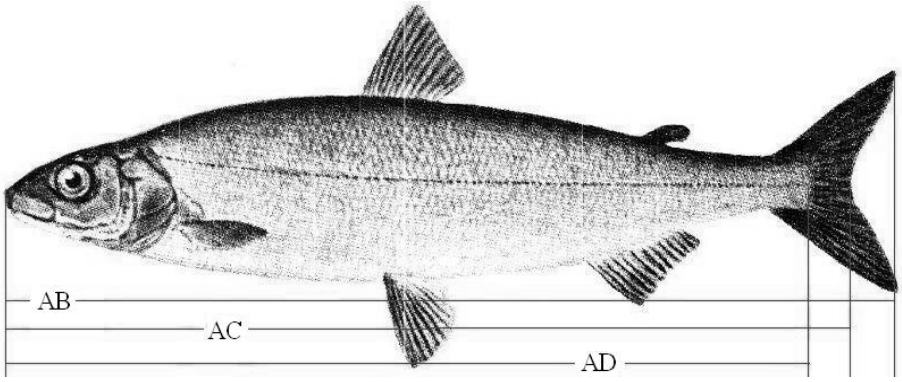



**Рис. 5.** Определение длины обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.):
AB – абсолютная длина, AC – длина по Смитту, AD – промысловая длина

**Fig. 5.** Length determination in whitefish *Coregonus lavaretus* (L.):
AB – total length, AC – length according to Smith, AD – standard length

Признаки, определяемые путем просчета, называются *меристическими.* К числу указанных показателей относятся число прободенных чешуй боковой линии (*ll.*), количество жаберных тычинок на первой жаберной дужке, количество позвонков, а также количество лучей в плавниках. Количество лучей в плавниках имеет большое систематическое значение. При этом учитывают число мягких (ветвистых) и жестких (неветвистых) лучей. Принято просчитывать лучи в первую очередь в спинном и анальном плавниках, и лишь иногда и в других плавниках [Правдин, 1966]. Пример: число лучей в спинном плавнике. Спинной или дорсальный плавник принято обозначать буквой D (сокращенное dorsalis). Неветвистые, нерасчлененные (продольно) лучи обозначаются римскими, а ветвистые (расчлененные) – арабскими цифрами.

Определяемые при помощи промеров признаки называются *пластическими.* К их числу относятся: длина туловища, длина головы, длина рыла, диаметр глаза, максимальная и минимальная высота тела, антедорсальное расстояние, антевентральное расстояние, антеанальное расстояние, наибольшая высота спинного плавника (рис. 6).

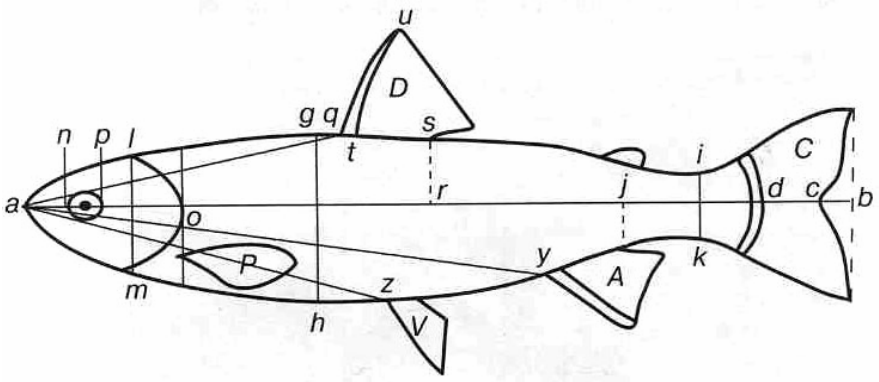



**Рис. 6.** Схема измерений рыб на примере лососевых (*Salmonidae)* по Смитту

**Fig. 6.** Fish measurements for *Salmonidae* according to Smith

**2.2. Фоторегистрация морфологических данных у рыб** *(А. В. Мелехин, Н. А. Бочкарёв, Е. М. Зубова)*

Сбор морфологических данных рыб в полевых условиях обычно сопряжен со значительными трудностями и занимает много времени. Учитывая время, необходимое на сбор чешуи, взятие навески икры и фиксации желудка, время обработки одной особи может достигать получаса. Метод цифровой фотографии с дальнейшей компьютерной обработкой в настоящее время широко применяется в биологии и облегчает получение морфологических данных рыб [Бочкарёв, Зуйкова, 2007; Muñoz-Muñoz, Perpinan, 2010; Бочкарёв и др., 2013]. Нередко после проведения морфологического или молекулярно-генетического анализа к некоторым образцам рыб, например, относящимся к таким сложным в таксономическом плане «комплексным видам», как *Coregonus lavaretus* sensu lato, *Salvelinus alpines* sensu lato, необходимо возвращаться повторно для уточнения принадлежности к той или иной «форме» или «расе», оценки морфологии особей, имеющих гибридный генотип, и т. д. При отсутствии фотографий этих образцов дополнительную информацию получить невозможно. Тщательное фотодокументирование материала предоставляет такую возможность [Бочкарёв и др., 2013].

*Техника*. Для получения кадров приемлемого (для дальнейших измерений) качества стоит использовать камеры со сменной оптикой (желательно макро). Под «качеством» мы понимаем техническое качество – высокие разрешение и резкость, малые искажения и низкую шумность. В целом техника необязательно должна быть дорогой. Неплохой вариант – камера Nikon с «кропнутой» матрицей и самым «хоботным» макрообъективом. Матрица желательна без антимуарового фильтра, так как последний уменьшает резкость.

*Оптика*. Необходим объектив с хорошей разрешающей способностью, желательно макрообъектив с фиксированным фокусным расстоянием («фикс»). Самый дешевый «фикс» дает лучшее качество картинки, чем самый дорогой зум-объектив («зум»). Чем больше фокусное расстояние – тем на большее расстояние необходимо отдалять камеру от объекта, при этом будет меньше искажений. В случае с «зумом» фокусное расстояние в средней части диапазона объектива дает наилучшее качество снимка. Фильтры необязательны, но лучше поставить так называемый «защитный» фильтр – при случайном повреждении сменить фильтр намного дешевле. Не стоит использовать кольца и насадки (линзы), лучше купить специализированный, пусть и самый дешевый макрообъектив.

*Штатив*. Подойдет любой выдерживающий вес камеры. Удобнее использовать специализированный макроштатив или штатив с переворачиваемой штангой для удобства изменения расстояния от камеры до объекта. Наличие отделяемой от штатива «головы» необязательно, но желательно. Удобнее всего использовать шаровую «голову» с длинными фокусировочными рельсами – шаровый шарнир обеспечивает бóльшую свободу, точность и удобство позиционирования, а наличие рельсов (имеются в виду простые встроенные рельсы, а не дорогие устройства для так называемого «стекинга») позволит достаточно тонко и при этом быстро определять высоту объектива.

*Пульт дистанционного управления*. Подойдет любой совместимый ИК-пульт. В отсутствие пульта съемку ведут в режиме «задержка спуска». Имеющаяся в камере функция «предподъем зеркала» позволит снизить колебания. Если указанной функции нет – используется режим "LiveView".

*Настройка камеры и оптики*. Функцию «подавление вибраций» необходимо отключить, поскольку при работе со штативом она не работает и может ухудшить результат. В большинстве случаев подойдет режим «приоритет диафрагмы», в случае необходимости рассеивать вспышку – «ручной». Показатель ISO необходимо выбирать в диапазоне не более 100–200. Большие значения приведут к шуму. Диафрагма – не менее 14, лучше 18. На «кропнутой» матрице значения выше 18 дают уже заметно размытое изображение объекта. Меньшие значения не дают необходимой глубины резкости. Формат файлов – внутренний JPG + RAW. Режим фокусировки необходимо выбирать ручной. Фокусирование следует производить на глаз рыбы. Это в большинстве случаев дает хороший результат. При низкой освещенности возможны большие выдержки. Если съемка происходит в помещении, в городе, то вибрации здания (от людей или техники на улице) приведут к микросмазмам при выдержках больше 1/60 сек. В данном случае стоит прибегнуть

к увеличению освещенности. В условиях отсутствия тряски (в поле, без ветра, когда штатив и объект ничего не сотрясает) допустима выдержка до нескольких секунд. Однако выдержек более 1 сек. следует избегать. При длинных выдержках увеличивается шумность кадра.

*Свет.* На улице в солнечную погоду необходимо снимать или в светлой палатке или закрыв объект небольшим куском любого рассеивающего материала (белый зонт, тент, кусок тонкого пенополиэтилена и т. п. неокрашенные материалы). В облачную погоду можно снимать без рассеивания. В сумерках, ночью, в помещении даже штативная съемка должна вестись с дополнительным освещением. Можно использовать вспышку с рассеиванием (куском бумаги или пенополиэтилена на вспышке). В этом случае режим съемки должен быть ручной, опытным путем необходимо подобрать нужную выдержку. Лучше организовать внешнее дополнительное освещение: бытовой светодиодной лампы или фонарика с рассеивателем на 20–40 Вт (обычные бытовые лампы – уже с рассеивателем) будет достаточно. Более эффективно использовать две лампы. Располагать лампы необходимо чуть выше нижней границы объектива (чтобы не светили в объектив), при этом как можно ближе к объекту (чтобы свет не терялся). В случае с рыбой – темную спинку стоит освещать сильнее, чем светлое брюшко.

*Фотографирование рыбы*. Рыба выкладывается на однотонный пенополипропиленовый коврик (или кусок пенополипропилена, покрытого однотонной матовой «плащовкой») левым боком вверх. Рыба (или ее часть, которую фотографируют) должна занимать бóльшую часть кадра, с «запасом» 1–2 см от левого и правого краев кадра (рис. 7). То есть расстояние от объектива должно быть минимальным из возможных. Фокусировка (лучше ручная, автофокус на таких расстояниях обычно работает некорректно) в случае с целой рыбой производится на глаз рыбы; в случае части рыбы – на самый выступающий, верхний участок объекта. Под отклоняющиеся от горизонтали голову и хвостовой стебель подкладываются подходящие по высоте предметы. Плавники расправляются и, при необходимости, фиксируются булавками. Оптическая ось объектива должна быть перпендикулярна плоскости подложки. Центр кадра должен находиться примерно в точке пересечения линий, проходящих через половины длины и высоты рыбы. Рядом выкладываются мерная линейка и карточка с номером рыбы. Как правило, делается несколько фотографий, в частности: общий вид, голова (в том числе и с максимально открытым ртом). Для некоторых видов нужно делать снимки головы с вентральной и дорзальной сторон. При необходимости фотографируются хвостовой стебель, плавники, жаберная дуга и другие диагностические органы [Бочкарёв и др., 2013].

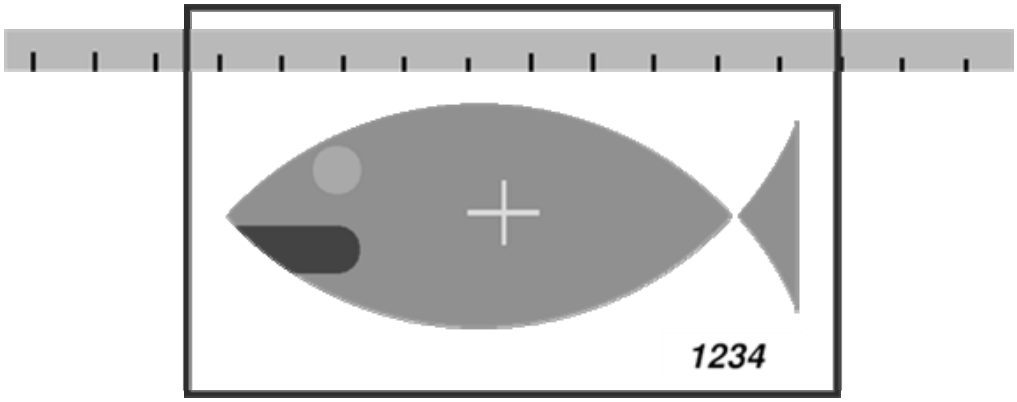



**Рис. 7.** Позиционирование рыбы, линейка и карточка с номером («1234») в кадре:
черным выделена граница кадра, светлым – центр кадра

**Fig. 7.** Positioning the fish, ruler and number label ("1234") in the frame:
the border of the frame is highlighted in black, the centre of the frame is highlighted in white

Проверенные варианты наборов техники для макросъемки и много другой полезной информации, касающейся фотографирования биологических объектов, на русском языке можно найти, например, в Макроклубе (http://macroclub.ru/). Сравнения наших наборов техники для полевой съемки неподвижных объектов – см. http://macroclub.ru/club/viewtopic.php?f=10&t=9903.

*Подготовка полученных снимков*. Если снимки получились приемлемые по свету, то для измерений рыбы внутрикамерного JPG будет достаточно. Массовая конвертация RAW в JPG с увеличением резкости и локального контраста возможна в любых современных программах типа Lightroom или Darktable, а также без графического интерфейса программами типа ufraw.

*Измерения*. Измерения цифровых изображений рыб проводятся в программе ImageJ либо аналогичной ей. Перед измерением каждой рыбы в программе ImageJ производится масштабирование фотографии – пиксели переводятся в мм или см.

При «натурном» анализе пластических признаков часто проявляются объективные и субъективные (индивидуальные навыки операторов, усталость) ошибки измерений, которые в дальнейшем исправить невозможно. К должным образом организованной библиотеке цифровых изображений всегда можно вернуться и выполнить недостающие или дополнительные, описывающие ту или иную морфологическую структуру, промеры повторно. В результате такого сбора и обработки морфологических данных мы получаем более точные размерные показатели признаков и исключаем случайное попадание ошибочных данных.

Таким образом, проведенные нами исследования морфологической изменчивости на разных группах животных, включая рыб, с использованием указанного выше подхода показали несколько положительных моментов:

– значительное ускорение сбора морфологического материала;

– создание библиотеки цифровых изображений видов рыб и других животных из различных регионов;

– организация материала в виде банка данных;

– сбор дополнительных морфологических признаков;

– неоднократное обращение к фотографии объекта;

– быстрый обмен материалом с коллегами;

– самостоятельная обработка любого образца из банка данных;

– повышение точности обработки данных;

– обработка данных методами геометрической морфометрии;

– привлекательность морфологических работ за счет упрощения первичной обработки материала;

– согласование морфологических исследований, выполненных разными операторами.

К недостаткам описанного метода можно отнести искажения, которые неизбежно присутствуют в фотографии, однако при должной тщательности и однообразном фотографировании их можно минимизировать.

### 2.3. Определение возраста рыб и методика расчисления темпа линейного роста рыб на примере обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.) оз. Имандра *(Е. М. Зубова, Н. А. Кашулин, П. М. Терентьев)*

Для определения возраста у рыб отбирают образцы чешуи (у лососевых, сиговых, корюшковых), жаберную крышку (оперкулярная кость, у окуневых), клейтрум (у щук) [Известия…, 1956; Правдин, 1966; Мина, 1973; Мина, Клевезаль, 1976]. Кроме того, в качестве регистрирующих структур также возможно использование отолитов. Отобранные образцы помещаются в конвертики или чешуйные книжки. При определении возраста рыбы чешуя промывается в разведенном нашатырном спирте от покрывающей ее слизи. Чешую после просветления в 10 %-ном растворе аммиака помещают между двумя предметными стеклами, просматривают и измеряют с помощью бинокуляра.

Чешуя, как регистрирующая структура, наиболее часто используется для обратных расчислений длины у рыб Северного полушария. Это требует подробного изучения ее морфологии и размерно-возрастной изменчивости [Брюзгин, 1969; Зубова, Кашулин, 2014 и др.]. Для исследования темпа роста рыб необходим более точный выбор метода обратных расчислений по чешуе, который объективно отражает линейные показатели рыб каждой возрастной группировки [Мина, 1973, 1981 и др.].

Для определения возраста и роста рыб чешую необходимо брать на определенных участках, обычно ее берут под спинным плавником в первом – третьем рядах над боковой линией. Это

делается для того, чтобы максимально исключить ошибки, зависящие от разных сроков закладки чешуи на разных участках тела рыбы. Здесь чешуя рыб обычно достаточно крупная и наименее подвержена эрозии [Зиновьев, Мандрица, 2003; Muir, Haas, 2003].

Особенности морфологии и фотографии чешуи некоторых видов рыб представлены в «Атласе чешуи пресноводных костистых рыб» [Галкин, 1958], а также в работе О. Ф. Черновой и Ю. Ю. Дгебуадзе [2008] «Архитектоника чешуи костистых рыб и ее диагностическое значение». Изучение морфологических характеристик чешуи (как и других костных регистрирующих структур) у рыб способствует правильному определению возраста и является основой для более точного описания темпов их линейного роста.

Следующим этапом при исследовании темпа роста рыб является выбор более точного метода обратных расчислений. В его основе лежит утверждение о наличии связи между размерами тела и регистрирующей структуры [Чугунова, 1959; Брюзгин, 1969; Мина, 1973, 1981; Решетников, 1980; Хуршут, 2000, 2003 и др.]. Простейший метод определения темпа роста предложен Э. Леа в 1910 г. [Чугунова, 1959; Брюзгин, 1969]. В его основе лежит допущение о том, что годовые изменения длины рыбы в онтогенезе прямо пропорционально и линейно связаны с соответствующими годовыми приростами регистрирующих структур. Математически это предложение может быть представлено следующим образом:

$$L_n/R_n = L_i/R_i, \quad (1)$$

где $L_n$ и $R_n$ – соответственно размеры тела и чешуи в момент поимки, $L_i$, $R_i$ – то же на $i$-том году жизни. Хотя многими исследователями показана неточность данного метода [Мина, Клевезаль, 1967; Брюзгин, 1969; Мина, 1981], он получил широкое распространение благодаря своей простоте. В данной формуле не учитывается размер малька на момент формирования чешуйного покрова. Поэтому при линейной зависимости вида $L = a + bR$, когда линия регрессии не проходит через начало координат, лучше пользоваться формулой Розы Ли:

$$L_i = L_n (R_i/R_n) + a (1 - R_i/R_n), \quad (2)$$

где $L_n$, $R_n$, $R_i$, $L_i$ – как к формуле Э. Леа, $a$ – постоянная величина.

Однако функция, описывающая связь размеров тела и чешуи, не всегда бывает линейной [Брюзгин, 1969]. В связи с большим объемом вычислений при нелинейной регрессии было разработано множество графических методов определения темпа роста: скалиметрический метод Сегерстроля, метод эмпирических шкал Брюзгина, метод унифицированных номограмм Вовка и др. [Чугунова, 1959; Брюзгин, 1969]. Современная вычислительная техника позволяет проводить регрессионный анализ взаимосвязи размеров тела и чешуи с выбором уравнения, наиболее достоверно описывающего изучаемую зависимость. Также обязательным условием оценки выбранного метода является соотнесение полученных расчисленных длин с фактическими (наблюденными) у рыб в разном возрасте, учитывая время их лова [Зубова, 2015]. Далее темпы линейного роста описываются по принятому алгоритму [Мина, 1973, 1981].

При описании особенностей и закономерностей расчисленных линейных характеристик рыб в основном приводятся абсолютные количественные показатели роста рыб (абсолютные линейные приросты), в то время как более удачным при сравнительных исследованиях роста оказывается применение относительных показателей [Шмальгаузен, 1935; Чугунова, 1959; Мина, Клевезаль, 1967; Дгебуадзе, 1979, 2001]. Таким показателем можно назвать удельную скорость роста Шмальгаузена-Броди, учитывающую нарастание длины по сложным процентам [Шмальгаузен, 1935; Мина, Клевезаль, 1976; Дгебуадзе, 2001; Сметанин, 2003]:

$$C_l = \frac{lgl_2 - lgl_1}{0{,}4343\ (t_2 - t_1)}, \quad (3)$$

где $C_i$ – удельная скорость роста, $l_1$, $l_2$ – значения исследуемых длин, т. е. длины в начале и конце отрезка времени, за который вычисляется удельная скорость роста, 0,4343 – модуль перехода от натуральных логарифмов к десятичным, $t_1$, $t_2$ – показатели времени от начала роста рыбы (от выхода из икры) до начала и конца отрезка времени, за который вычисляется удельная скорость роста.

Описание периодов роста рыб проводится по формуле константы роста И. И. Шмальгаузена, предполагающей, что произведение удельной скорости роста на время, протекшее с начала роста, является постоянной величиной для отдельных периодов роста, на которые приходится развитие всякого живого [Шмальгаузен, 1935; Чугунова, 1959; Мина, Клевезаль, 1976]:

$$C_{lt} = \frac{lgl_2 - lgl_1}{0{,}4343\ (t_2 - t_1)} \cdot \frac{t_2 + t_1}{2}, \quad (4)$$

где $C_{lt}$ – константа роста, $l_1$, $l_2$, 0,4343, $t_1$, $t_2$ – как к формуле удельной скорости роста. Также периоды роста у рыб выделяют на основе характеристики роста В. В. Васнецова [Чугунова, 1959; Мина, Клевезаль, 1967; Брюзгин, 1969].

Периоды роста сопряжены с изменением условий обитания (внешние причины) или изменением физиологического состояния особей (внутренние причины) [Шмальгаузен, 1935; Мина, Клевезаль, 1976]. Чаще всего в ихтиологических работах периодичность роста сопоставляется с таким внутренним фактором, как половое созревание.

Как известно, рост является суммарным выражением многих сторон экологии и своеобразным индикатором состояния популяции в целом [Никольский, 1973; Дгебуадзе, 1979, 2001]. Особенности и закономерности изменения роста рыб, происходящие всю их жизнь, определяются видовыми (наследственными) свойствами, а также зависят от многих абиотических и биотических факторов, определяющих состояние как самого организма, так и окружающей его среды, что затрудняет интерпретацию регистрируемых в природных водоемах ростовых характеристик [Васнецов, 1934, 1953; Никольский, 1963, 1974; Поляков, 1971; Мина, Клевезаль, 1976; Дгебуадзе, 1979, 2001; Бретт, Гроувс, 1983; Яржомбек, 1996; Сметанин, 2003].

По представленным работам можно судить о том, что в качестве основных абиотических факторов, влияющих на рост рыб, указываются температуры и солевой состав воды. Важнейшим фактором, определяющим рост рыб, считается обеспеченность пищей. Неоднократно подчеркивалась зависимость темпа роста не от возраста, а размеров особей. Считается, что обычно молодые и старые животные по-разному реагируют на воздействие внешних факторов. Эти воздействия по-разному отражаются на ходе процессов роста: скорость линейного роста неполовозрелых рыб в большей мере зависит от характера условий обитания в том или ином водоеме, чем скорость половозрелых особей.

Влиянием комплекса взаимодействующих факторов, изменением зависимости каждого фактора можно объяснить противоречия, возникающие у разных авторов при попытках установить основные причины изменения темпа роста рыб. Действие этого сложного комплекса факторов внешней и внутренней среды и обуславливает разброс полученных данных, разнообразие изменений параметров роста. Детерминистское описание роста, учитывающее многочисленные, часто очень существенные изменения, в настоящее время нам не представляется возможным [Сметанин, 2003].

Для примера изучения темпов линейного роста рыб можем предложить рассмотреть работу Е. М. Зубовой [2015] «Линейный рост европейского сига *Coregonus lavaretus* (L.) в антропогенно-модифицированных водоемах европейской субарктики (на примере Мурманской области)» – см. https://www.researchgate.net/publication/278301671_DISSERTATION_Lineal_growth_of_European_whitefish_Soregonus_lavaretus_L_in_anthropogenically_modified_waters_of_European_subarctic_waters_for_example_Murmansk_region.

### 2.4. Метод патологоморфологического анализа состояния организма рыб *(П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, Н. А. Кашулин, И. М. Королёва)*

Патологоморфологический метод включает в себя клинические, патологоанатомические и гистологические исследования, которые, взаимно дополняя друг друга, позволяют составить представление и дать заключение о чувствительности и устойчивости рыб к изменениям экологической ситуации в водоеме [Аршаница, Лесников, 1987]. Система кодировки информации по каждому органу позволяет дать численное значение интенсивности отклонения от нормы и/или заболевания. При этом она достаточно субъективна и требует подготовки ихтиолога к экспертной оценке. Модифицированная нами для рыб субарктических водоемов шкала Аршаницы, Лесникова [1987] предполагает следующую градацию:

0 – визуально невыявляемые патологические изменения;

1 – повреждения легкие, едва выявляемые и не угрожающие рыбам гибелью;

2 – повреждения средней тяжести, при которых организм рыб может выжить, но появление дополнительных неблагоприятных факторов может вызвать его гибель;

3 – признаки глубоких необратимых изменений жизненно важных органов, наиболее вероятным следствием которых является летальный исход.

Визуальный осмотр и патологоанатомическое вскрытие проводят у живых, только что выловленных рыб. В полевых условиях полную диагностику проводят в течение 40–60 мин. Это связано с тем, что рыбы быстро «засыпают» на воздухе, что приводит к депигментации кожных покровов, изменениям цвета печени и окраски жабр. Некоторые заболевания, такие, как изменения формы органов, соединительно-тканные разрастания в почках, нефрокальцитоз, можно диагностировать по прошествии довольно длительного времени.

При внешнем (наружном) осмотре обращается внимание на интенсивность окраски и ее изменения, целостность плавниковой каймы и лучей, общее содержание слизи на поверхности рыбы, состояние чешуйного покрова. Необходимо фиксировать случаи гиперемии, подкожных кровоизлияний, язв и сколиоза, оценить состояние жаберных крышек, ротовой полости, анального отверстия, состояние костей черепа, пигментацию покровов. Оценивается состояние жабр (цвет, состояние жаберных лепестков и тычинок).

Вскрытие брюшной полости осуществляется ножом или ножницами – с анального отверстия к ротовой полости. После вскрытия отмечается топографическое расположение внутренних органов (печени, почек, гонад, селезенки, сердца, желудка, кишечника). Отмечается количество полостного жира, определяется в баллах жирность рыбы. Обращают внимание на состояние мышц (цвет, консистенция, наличие кровоизлияний, прикрепление к костям), цвет и форму печени, состояние и стадию зрелости гонад. Оценивается состояние почек (истончение, кровенаполненность, наличие изменений в мочеточниках, отложение камней), сердца (ожирение, сращивание с другими органами или брюшной стенкой).

### 2.5. Основные подходы к гематологическому анализу *(И. М. Королёва)*

Гематологические показатели отражают физиологические и патологические изменения организма. Изменения показателей крови могут выступать в качестве специфических маркеров для оценки состояния организмов рыб [Житенева и др., 1989; Моисеенко, 1998]. Динамику клинических показателей крови можно анализировать по изменению количественных и качественных характеристик (табл. 1).

**Таблица 1.** Некоторые клинические показатели крови рыб

**Table 1.** Some clinical parameters of fish blood

| Количественные | Качественные |
|---|---|
| Уровень (или содержание) общего гемоглобина<br>Количество форменных элементов крови<br>Процентное соотношение различных групп клеток крови:<br>эритрограмма<br>лейкограмма<br>Скорость оседания эритроцитов (СОЭ)<br>Размер клеток и ядра<br>Содержание гемоглобина в эритроците | Морфологические характеристики:<br>форма клетки, ядра;<br>окраска цитоплазмы, ядра;<br>наличие вакуолей и гранул в цитоплазме;<br>структура ядра (особенности хроматина, наличие ядрышек).<br>Патологические изменения клеток:<br>анизоцитоз (разноразмерность);<br>пойкилоцитоз (нарушение формы);<br>появление шитоцитов.<br>Патологии ядра:<br>кариорексис; кариолизис; пикноз; наличие микроядер |

Форменные элементы красной крови – эритроциты – составляют главную буферную систему крови благодаря содержащемуся в них гемоглобину. В процессе эритропоэза выделяют несколько стадий, конечной из которых является зрелый (ортохромный) эритроцит, содержащий гемоглобин (рис. 8).

Признаками патологических изменений эритроцитов рыб являются *анизохромия* – явление различной интенсивности окраски эритроцитов. Уменьшение интенсивности окраски – *гипохромия* – свидетельствует о низком насыщении клетки гемоглобином. *Гиперхромия* – слишком яркая окраска эритроцитов – может быть связана как с увеличением толщины клеток, так и с повышенным содержанием в них гемоглобина. В качестве негативных трансформаций эритроцитов

рассматривают также *пойкилоцитоз* – появления в крови эритроцитов различной формы; *анизоцитоз* (разноразмерность эритроцитов), свидетельствующий о функциональной недостаточности кроветворных органов. Аномалии ядер могут выражаться в *хроманолизе* (распаде хроматина); *кариолизисе* (растворении части ядра); *пикнозе* (уплотнении хроматина ядра); *кариорексисе* (распаде ядра на части); *вакуолизации*. Подобные нарушения возникают вследствие влияния цитотоксических, генотоксических, мутагенных и канцерогенных агентов.

Форменные элементы белой крови – лейкоциты – представлены незернистыми (агранулоциты) и зернистыми (гранулоциты) формами.

В состав незернистых лейкоцитов входят лимфоциты, моноциты. *Лимфоциты* являются наиболее многочисленной группой клеток белой крови. Они представлены малыми (самыми многочисленными), средними и большими лимфоцитами. Основная функция лимфоцитов связана с реализацией иммунологических реакций организма. Малые лимфоциты – сравнительно небольшие клетки округлой формы, бóльшую часть которых занимает ядро. У зрелых клеток ядро округлое, цитоплазма образует узкий ободок вокруг ядра, иногда вообще как бы отсутствует (рис. 9). *Моноциты* – это наиболее крупная клетка среди лейкоцитов (до 20 мкм).

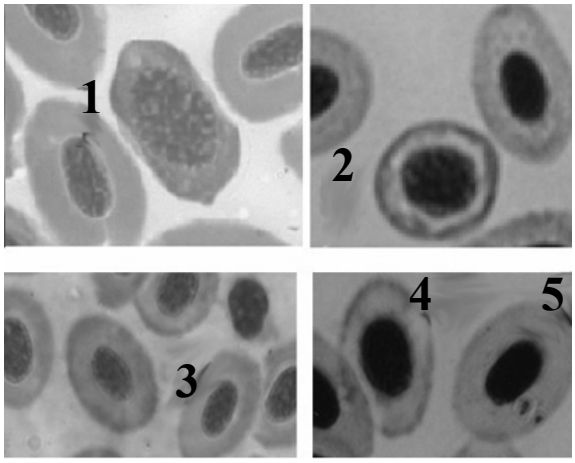



**Рис. 8.** Стадии развития эритроцитов:

1 – проэритробласт, 2 – нормобласт, 3 – базофильный эритробласт, 4 – полихроматофильный эритробласт, 5 – зрелый эритроцит

**Fig. 8.** Stages of red blood cell development:

1 – proerythroblast, 2 – normoblast, 3 – basophilic erythroblast, 4 – polychromatophilic erythroblast, 5 – mature erythrocyte

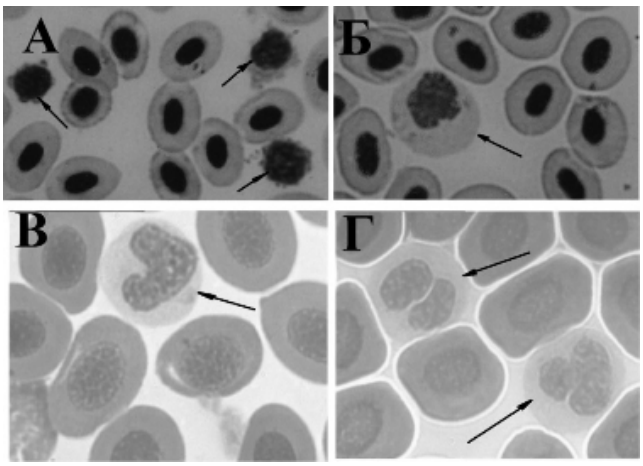



**Рис. 9.** Клетки белой крови:

агранулоциты: А – лимфоциты, Б – моноциты. Гранулоциты: В – палочкоядерный нейтрофил, Г – сегментоядерный нейтрофил

**Fig. 9.** White blood cells:

agranulocytes: A – lymphocytes, Б – monocytes. Granulocytes: B – band-shaped neutrophil, Г – segmented neutrophil

Зернистые лейкоциты представлены нейтрофилами, эозинофилами и базофилами. *Нейтрофилы* имеют округлую форму, цитоплазма слабооксифильна. Основной их функцией является освобождение организма от остатков разрушенных клеток и тканей, от инфекции и одновременно от токсических воздействий. Процентное соотношение различных по стадии зрелости нейтрофилов имеет большое диагностическое значение.

В полевых условиях взятие крови производится у живых или только что уснувших рыб. Кровь отбирается капилляром от гемометра Сали из гемального канала хвостового стебля после отсечения хвоста. Первая порция крови используется для определения общего содержания гемоглобина, вторая – для подсчета числа эритроцитов в камере Горяева. Кровь также набирается в капилляр от аппарата Панченкова для определения скорости оседания эритроцитов (СОЭ).

Содержание гемоглобина в эритроците вычисляется по формуле Гительзона (общее содержание Hb (г/л) / общее количество эритроцитов в 1 мкл). В качестве примера приведем данные о характеристике крови сигов ряда озер Мурманской области (табл. 2, 3).

**Таблица 2.** Характеристика красной крови сигов

**Table 2.** Characteristics of whitefish red blood

| Водоемы | Период, гг. | Hb, г/л | Эритроциты, млн/мм$^3$ | СГЭ | Зрелые эритроциты |
|---|---|---|---|---|---|
| | | M±m<br>*min-max* | M±m<br>*min-max* | пг | % |
| Условно-фоновые водоемы (районы) | | | | | |
| оз. Кочеяур | 2005–2007 | 108±27<br>62–146 | 1,45±0,07<br>1,40–1,50 | 0,75 | 98,9 |
| губа Кунчаст (оз. Имандра) | 1996–1997 | 107±3,3<br>76–144 | 1,02±0,09<br>0,6–1,2 | 0,95 | 94,4 |
| оз. Чунозеро | 2000–2001 | 110±2<br>90–140 | 1,0±0,03<br>0,7–1,35 | 0,90 | 97,0 |
| Загрязненные водоемы (районы) | | | | | |
| оз. Куэтсъярви | 2005–2007 | 90±9<br>78–104 | 1,18±0,25<br>0,90–1,70 | 0,75 | 98,4 |
| губа Монче (оз. Имандра) | 1997 | 100±2<br>74–134 | 0,94±0,03<br>0,57–1,4 | 1,1 | 93,2 |
| губа Белая (оз. Имандра) | 1997 | 93±3<br>15–130 | 0,80±0,03<br>0,13–1,28 | 1,16 | 89,3 |

**Таблица 3.** Характеристика белой крови сигов

**Table 3.** Characteristics of whitefish white blood

| Водоемы | Период, гг. | ИОЛ | Лимфоциты, % | Моноциты, % | Нейтрофилы, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | M±m | M±m | M±m |
| Условно-фоновые водоемы (районы) | | | | | |
| оз. Кочеяур | 2005–2007 | 1,2±0,04 | 94,0±0,82 | 0,4±0,09 | 5,6±0,73 |
| г. Кунчаст (оз. Имандра) | 1997 | 0,9±0,2 | 94,6±1,5 | 3,1±1,4 | 2,3±0,6 |
| Охтозеро | | 0,46±0,08 | 88,0±5,0 | 2,0±0,7 | 10,0±6,0 |
| Загрязненные водоемы (районы) | | | | | |
| оз. Куэтсъярви | 2005–2007 | 1,0±0,07 | 94,7±0,74 | 0,5±0,16 | 4,8±0,6 |
| г. Монче (оз. Имандра) | 1997 | 0,92±0,2 | 92,1±1,2 | 5,4±0,7 | 2,5±0,3 |
| г. Белая (оз. Имандра) | 1997 | 1,7±0,4 | 94,0±1,6 | 3,7±1,3 | 2,3±1,6 |

Гемоглобин крови является главным звеном в обеспечении организма кислородом. Его высокое содержание обеспечивает более интенсивный обмен и широкие возможности для выживания в неблагоприятных условиях. Количество незрелых эритроцитов у сигов из загрязненных озер в несколько раз выше, чем у рыб из фоновых озер.

Анализ гематологических показателей в целях оценки состояния отдельного организма и популяции в целом необходимо начинать с изучения условий конкретного водоема. После сбора сведений о гидрологических, гидрохимических и гидробиологических особенностях реки или озера и определения показателей «нормы» можно переходить к пониманию механизмов адаптации рыб. В целях получения объективной картины следует сочетать как количественные, так и качественные методы исследования показателей крови.

### 2.6. Изучение особенностей питания обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.) *(П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, И. М. Королёва)*

Для определения характера и особенностей питания у рыб отбирают желудки с максимальной степенью их наполнения. Содержимое желудков фиксируют 70 %-ным спиртовым раствором для последующего лабораторного анализа [Правдин, 1966].

Для изучения питания пресноводных рыб применяется метод индивидуального сбора. Следует учитывать, что за продолжительное время пребывания рыбы в сетях происходит частичное

или полное переваривание пищи или ее отрыгивание и полученный материал дает заниженные количественные данные по характеристике питания. При степени наполнения желудков 3–4 балла (рис. 10) проводится их фиксация 70º этиловым спиртом для дальнейшего камерального определения качественного и количественного состава пищевого комка [Методическое пособие..., 1974]. Каждый желудок следует размещать в отдельный флакон и снабжать этикеткой.

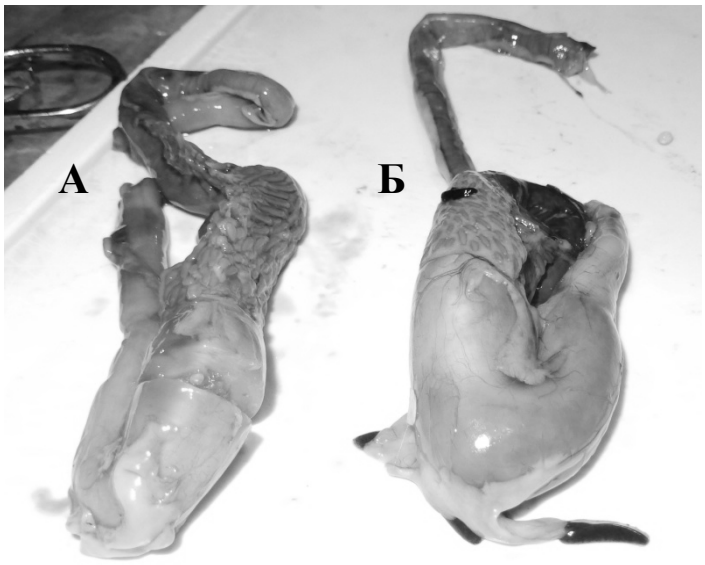



**Рис. 10.** Извлеченные желудки с различной степенью наполнения:
А – пустой (0 баллов), Б – 3 балла

**Fig. 10.** Extracted stomachs with varying degrees of filling:
А – empty (0 points), Б – 3 points

### 2.7. Отбор образцов органов и тканей обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.) для анализа тяжелых металлов *(П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, Н. А. Кашулин, И. М. Королёва)*

Для определения микроэлементного состава органов и тканей рыб используется свежий ихтиологический материал. Отбор образцов производится у равноразмерных особей рыб. Для анализа, как правило, отбирают 10–15 экземпляров каждого вида рыб. Образцы тканей получают при помощи ножа и скальпеля из нержавеющей стали. В зависимости от размера исследуемых рыб масса навески ткани варьирует от 0,3 (ряпушка) до 7 г (щука, кумжа) граммов. Каждый образец с указанием номера рыбы, места и даты отбора помещается в отдельный полиэтиленовый пакет и замораживается в морозильной камере или жидком азоте. В замороженном виде образцы хранятся вплоть до проведения химического анализа в лаборатории.

**Заключение.** В настоящей работе рассматриваются основные подходы и принципы ихтиологических исследований пресноводных экосистем. Следует помнить, что проведение работ на льду в зимний период должно проводиться с соблюдением необходимых мер безопасности.

Отбор ихтиологических проб в зимний период в значительной степени затруднен и требует больших трудозатрат и времени в отличие от периода открытой воды. В арктических широтах в условиях полярной ночи это имеет определяющее значение. Поэтому применение подходов фоторегистрации морфологических данных у рыб позволяет с большей эффективностью осуществлять анализ полученного материала.

Необходимо помнить, что работа с отобранным ихтиологическим материалом, в особенности при изучении состояния организмов как индикаторов качества среды, исследования процессов питания, созревания, роста, определение биохимических параметров, паразитологический и патологоморфологический анализ предполагают использование для анализа свежей рыбы.

Особенности роста отдельных организмов рыб могут служить индикатором состояния популяции в целом. Закономерности изменения роста рыб на протяжении всей их жизни определяются видовыми (наследственными) свойствами, а также зависят от многих абиотических и биотических факторов, определяющих состояние как самого организма рыб, так и окружающей его среды.

## Вопросы для самоконтроля

1. Что изучает ихтиология?
2. Что относится к пластическим и меристическим признакам?
3. Назовите достоинства применения фоторегистрации морфологических данных рыб.
4. Какая из «регистрирующих структур» рыб может быть использована для изучения особенностей их роста?
5. Что в себя включают форменные элементы крови обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (L.)?

## Литература


*Аршаница Н. М., Лесников Л. А.* Патолого-морфологический анализ состояния рыб в полевых и экспериментальных токсикологических исследованиях // Методы ихтиологических исследований. Л.: ГосНИОРХ НПО Примрыбвод, 1987. С. 7–9.

*Бочкарёв Н. А., Зуйкова Е. И.* Дополнительные возможности сбора морфологических данных у рыб // Биологические аспекты рационального использования и охрана водоемов Сибири. Томск: Лито-Принт, 2007. С. 24–25.

*Бочкарёв Н. А., Зуйкова Е. И., Политов Д. В.* Дополнительные возможности сбора и регистрации морфологических данных у рыб // Биология, биотехника разведения и состояние запасов сиговых рыб: Материалы международной конференции. Тюмень, 2013. С. 32–36.

*Бретт Д., Гроувс Т.* Физиологическая энергетика // Биоэнергетика и рост рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 203–274.

*Брюзгин В. Л.* Методы изучения роста рыб по чешуе, костям и отолитам. Киев: Наукова думка, 1969. 188 с.

*Васнецов В. В.* Опыт сравнительного анализа роста карповых рыб // Зоологический журнал. 1934. Т. 13, вып. 3. С. 540–583.

*Васнецов В. В.* О закономерностях роста рыб / Очерки по общим вопросам ихтиологии: сб. тр. М.; Л.: АН СССР, 1953. С. 218–226.

*Вовк Ф. И.* О методике реконструкции рыб по чешуе // Биол. ст. «Борок» АН СССР. 1956. Вып. 2. С. 351–392.

*Галкин Г. Г.* Атлас чешуи пресноводных костистых рыб // Известия: ГосНИОРХ, 1958. Т. 46. 105 с.

*Головина Н. А.* Методы гематологических исследований в ихтиологической практике / В кн. Рыбохозяйственное использование внутренних водоемов. Вып. 4. 1979. С. 8–18.

*Дгебуадзе Ю. Ю.* Рост леща в водоемах разных широт / Изменчивость рыб пресноводных экосистем: сб. тр. М.: Наука, 1979. С. 74–92.

*Дгебуадзе Ю. Ю.* Экологические закономерности изменчивости роста рыб. М.: Наука, 2001. 276 с.

*Житенева Л. Д., Полтавцева Т. Г., Рудницкая О. А.* Атлас нормальных и патологически измененных клеток крови рыб. Ростов-на-Дону: Ростовское кн. изд-во, 1989. 112 с.

*Зиновьев Е. А., Мандрица С. А.* Методы исследования пресноводных рыб: учеб. пособие. Пермь: Пермск. гос. ун-т, 2003. 113 с.

*Зубова Е. М.* Линейный рост европейского сига *Coregonus lavaretus* (L.) в антропогенно-модифицированных водоемах европейской субарктики (на примере Мурманской области): автореф. дис. … канд. биол. наук: 03.02.08. Пермь, 2015. 28 с.

*Зубова Е. М., Кашулин Н. А.* Современные особенности морфологии и роста чешуи малотычинкового сига *Coregonus lavaretus lavaretus* (Coregonidae) озера Имандра в условиях интенсивного техногенного загрязнения // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2014. № 5. С. 140–149.

Инструкция по физиолого-биохимическим анализам рыбы. М.: ВНИИПРХ, 1986. 59 с.

Известия Всесоюзного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства. Т. XLVI. Л., 1956. 65 с.

*Кашулин Н. А., Лукин А. А., Амундсен П.-А.* Рыбы пресных вод Субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 142 с.

*Крылов О. Н.* Методологический подход к классификации токсикозов рыб естественных водоемов // Изв. ГосНИОРХ, 1974. Т. 98. С. 91–94.

*Кудрявцев А. А., Кудрявцева Л. А., Привольнев Т. И.* Гематология животных и рыб. М.: «Колос», 1969. 320 с.

*Кузнецова Е. Н.* Сравнительный анализ роста солоноватоводных сигов моря Лаптевых: автореф. дис. … канд. биол. наук: 03.00.16. М., 1993. 22 с.

*Куперман Б. И.* Паразиты рыб как биоиндикаторы загрязнения водоемов // Паразитология. 1992. Т. 26, № 6. С. 479–482.

Лабораторно-клинические методы диагностики патологий у атлантического лосося, вызванных повреждающими факторами алиментарной природы. Справочное пособие ПетрГУ. СевНИИРХ. Петрозаводск, 1994. 30 с.

*Лукьяненко В. И.* Общая ихтиотоксикология. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 320 с.

Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях. М., 1974. 254 с.

*Мина М. В.* Рост рыб (методы исследования в природных популяциях) / Рост животных. Зоология позвоночных: сб. тр. М.: ВИНИТИ, 1973. С. 68–115.

*Мина М. В.* Задачи и методы изучения рыб в природных условиях / Современные проблемы ихтиологии: сб. тр. М.: Наука, 1981. С. 177–195.

*Мина М. В., Клевезаль Г. А.* Рост животных. М.: Наука, 1976. 291 с.

*Моисеенко Т. И.* Гематологические показатели рыб в оценке их токсикозов // Вопросы ихтиологии. Т. 38, № 3. 1998. С. 371–380.

*Моисеенко Т. И.* Экотоксикологический подход к оценке качества вод // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 4. С. 410–424.

*Немова Н. Н.* Биохимические эффекты накопления ртути у рыбы. М.: Наука, 2005. 168 с.

*Никольский Г. В.* Экология рыб. М.: Высшая школа, 1963. 368 с.

*Никольский Г. В.* Теория динамики стада рыб. М.: Пищевая промышленность, 1974. 447 с.

*Новиков Г. Г.* Рост и энергетика развития костистых рыб в раннем онтогенезе. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 296 с.

*Поляков Г. Д.* Количественная оценка и приспособительное значение изменчивости плодовитости и скорости воспроизводства популяций рыб / Закономерности роста и созревания рыб: сб. тр. М.: Наука, 1971. С. 5–20.

*Правдин И. Ф.* Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 456 с.

*Решетников Ю. С.* Экология и систематика сиговых рыб. М.: Наука, 1980. 301 с.

*Сметанин М. М.* Статистические методы в экологии рыб. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2003. 200 с.

*Смирнов В. С., Божко А. М., Рыжков Л. П., Добринская Л. А.* Применение метода морфофизиологических индикаторов в экологии рыб. Петрозаводск: Карелия, 1972. 168 с.

*Хуршут Э. Э.* К методике обратного вычисления темпа роста рыб с использованием регрессионной зависимости между размерами тела и чешуи // Сохранение биоразнообразия на особо охраняемых территориях Узбекистана. Ташкент, 2000. С. 122–124.

*Хуршут Э. Э.* Морфология чешуи и рост корейской востробрюшки (*Hemiculter leucisculus Basilewsky*) в водоемах среднего течения реки Сырдарья // Selevinia, Казахстанский зоологический ежегодник. Алматы, 2003. С. 29–34.

*Чернова О. Ф., Дгебуадзе Ю. Ю.* Архитектоника чешуи костистых рыб и ее диагностическое значение. М.: Наука, 2008. 136 с.

*Чугунова Н. И.* Руководство по изучению возраста и роста рыб. М.: АН СССР, 1959. 164 с.

*Шмальгаузен И. И.* Определение основных понятий и методика исследования роста / Рост животных: сб. тр. М.; Л.: Биомедгиз, 1935. С. 8–60.

*Яржомбек А. А.* Биологические ресурсы роста рыб. М.: ВНИРО, 1996. 165 с.

*Amundsen P.-A., Kashulin N. A., Terentjev P. M., Gjelland K., Koroleva I. M., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Kashulin A. N. and Knudsen R.* Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse // Envir. Monitoring and Assessment. 2011. Vol. 182. P. 301–316.

*Casselman J. M.* Growth and relative size of calcified structures of fish // Transactions of the American Fisheries Societi. 1990. N 119. P. 673–688.

*Jones J. C., Reynolds J. D.* Effects of pollution on reproductive behaviour of fishes // Reviews in Fish Biology and Fisheries. 1997. Vol. 7. P. 463–491.

*Hosseini M., Nabavi S. M. B., Nabavi S. N. N., Pour N. A.* Heavy metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Fe, and Hg) content in four fish commonly consumed in Iran: risk assessment for the consumers // Envir. Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187. P. 230–237.

*Muir A., Haas T.* Manual of standart methods for the Chippewas of Nawash calcified structure analysis facility. Chippewas of Nawash First Nation, Fish Assessment Program. Canada, 2003. 59 p.

*Muñoz-Muñoz F., Perpiñán D.* Measurement error in morphometric studies: comparison between manual and computerized methods // Ann. Zool. Fennici. 2010. 47. P. 46–56.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Терентьев Петр Михайлович**
старший научный сотрудник, к.б.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: p.terentjev@ksc.ru

**Зубова Елена Михайловна**
старший научный сотрудник, к.б.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: seelewolf84@yandex.ru

**Королёва Ирина Михайловна**
научный сотрудник, к.б.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: i.koroleva@ksc.ru

**Кашулин Николай Александрович**
главный научный сотрудник, проф., д.б.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: n.kashulin@ksc.ru

**Мелехин Алексей Валерьевич**
старший научный сотрудник, к.б.н.
Полярно-альпийский ботанический сад-институт
им. Н. А. Аврорина,
ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 18а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: melihen@yandex.ru

**Бочкарёв Николай Анатольевич**
старший научный сотрудник, к.б.н.
Институт систематики и экологии животных
СО РАН, ул. Фрунзе, 11,
Новосибирск, Россия, 630091
эл. почта: nikson_1960@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

**Terentjev, Pyotr**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: p.terentjev@ksc.ru

**Zubova, Elena**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: seelewolf84@yandex.ru

**Koroleva, Irina**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: i.koroleva@ksc.ru

**Kashulin, Nikolai**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: n.kashulin@ksc.ru

**Melekhin, Aleksei**
Polar-Alpine Botanical Garden-Institute,
Kola Science Centre RAS
18a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: melihen@yandex.ru

**Bochkarev, Nikolai**
Institute of Systematics and Ecology of Animals (ISEA),
Siberian Branch of RAS
11, Frunze St., 630091,
Novosibirsk, Russia
e-mail: nikson_1960@mail.ru

# ГИДРОФИЗИКА
# HYDROPHYSICS











УДК 556.555.5:556.08

# ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ НАУЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ ОЗЕРАХ

**Р. Э. Здоровеннов[1], А. В. Кураев[2, 3], Г. Э. Здоровеннова[1], И. В. Фёдорова[4]**

[1]*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,*
*ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*
[2]*LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France*
[3]*Томский государственный университет, Россия*
[4]*Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Россия*

**Аннотация.** Рассмотрены основные вопросы, возникающие при организации и проведении научных измерений на покрытых льдом озерах, включая подготовительный этап. Приводятся правила безопасного поведения на льду, примерный список экипировки, необходимой для безопасного и комфортного проведения измерений в суровых зимних условиях (низкие температуры воздуха, ветер, контакт с водой). Рассматриваются основные виды льда, приводится сравнение их прочности и способности выдерживать вес исследователей и научного оборудования. Рассматриваются также факторы, снижающие прочность льда, которые должны приниматься во внимание при выборе места для проведения измерений, передвижений по льду и устройстве ледового лагеря. Приводятся список необходимого при проведении измерений на покрытых льдом озерах оборудования и некоторые правила его использования. Рассматриваются некоторые способы решения таких задач, как установка и закрепление палаток на поверхности льда, закрепление приборов для длительных измерений на льду, в толще льда и подо льдом, с учетом требований к обеспечению их неподвижности и сохранности в течение всего запланированного периода измерений.

**Ключевые слова:** покрытые льдом озера; снежно-ледяной покров; гидрофизические измерения; измерительное оборудование; техника безопасности; ледовый лагерь.

## ORGANIZATION OF SCIENTIFIC WORK ON ICE-COVERED LAKES

**R. E. Zdorovennov[1], A. V. Kouraev[2, 3], G. Z. Zdorovennova[1], I. V. Fedorova[4]**

[1]*Northern Water Problems Institute,*
*Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*
[2]*LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France*
[3]*Tomsk State University, Russia*
[4]*St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Russia*

**Summary.** The most important issues arising during the organization and implementation of scientific measurements on ice-covered lakes, including the preparatory stage, are considered. The rules of safe behavior on ice and an approximate list of equipment necessary for safe and comfortable measurements in harsh winter conditions (low air temperatures, wind, and contact with water) are given. The main types of ice are described; their strength and ability to carry the weight of researchers and scientific equipment are compared. Attention is drawn to the factors that reduce ice strength, which should be taken into account when choosing the place for measurements, moving on ice, and setting up an ice camp. A list of equipment required for measurements on ice-covered lakes and some rules for its use are provided. Some solutions are suggested for dealing with tasks such as setting up and fixing tents on the ice surface, fixing instruments for long-term measurements on ice, in the ice mass and under ice so asto ensure their immobility and safety throughout the planned measurement period.

**Keywords:** ice-covered lakes; snow and ice cover; hydrophysical measurements; measuring equipment; safety engineering; ice camp.

**Тема лекции.** «Организация и проведение научных измерений на покрытых льдом озерах».

**Цель.** Ознакомление обучающихся со спецификой организации и проведения научных измерений на льду озер, организации ледового лагеря, правилами безопасности при измерениях и перемещениях по льду, особенностями эксплуатации измерительных приборов в условиях низких температур, а также с методиками закрепления приборов на льду и их извлечения после окончания измерений. Лекция может использоваться при обучении студентов гидрологов, океанологов, а также при проведении уроков географии в школе.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Планирование полевых измерений на льду: подбор экипировки, инструктаж по технике безопасности, предварительный выбор мест измерений, подготовка оборудования, логистические задачи.

2. Типы льда, несущая способность снежно-ледяного покрова, принципы выбора мест на акватории водоема для безопасных измерений на льду.

3. Организация стационарного лагеря на берегу и на льду. Организация научных работ на льду.

4. Особенности проведения измерений со льда. Закрепление и извлечение приборов.

Заключение.

**План изложения материала.** В начале лекции освещаются вопросы, которые нужно иметь в виду при планировании полевых исследований на льду водоемов, включая подбор экипировки, инструктаж по технике безопасности при работах на льду, подготовку измерительного и вспомогательного оборудования, анализ картографического материала и других источников информации для предварительного выбора безопасных мест измерений на акватории водоема, логистические вопросы. Подробно разбираются правила поведения на льду, основные виды травм, получаемых в зимних полевых условиях, принципы оказания помощи пострадавшим. Далее приводится информация по требованиям к толщине и состоянию льда, рассматриваются принципы выбора положения станций измерений с учетом наблюдаемого состояния поверхности и толщины льда для обеспечения безопасности исследований. Затем рассматриваются особенности организации однодневных научных измерений, а также многодневных измерений в ледовом лагере. В заключение рассматриваются особенности установки приборов для длительных измерений, а также приводятся некоторые решения для ряда задач, возникающих при проведении измерений в полевых условиях.

Лекция сопровождается презентацией, содержащей иллюстративный материал, фотографии измерительных инструментов, экипировки, многодневного ледового лагеря, а также некоторых рабочих моментов измерений. В ходе лекции демонстрируются фотографии, сделанные при выполнении ряда российских и международных научных проектов на разнотипных озерах России – больших озерах Байкале и Онежском, малых водоемах Карелии и Арктической зоны (дельта р. Лены, озера Кольского п-ова). Список проектов приведен в заключении.

## Изложение материала

**Введение.** При изучении озер периоду открытой воды традиционно уделяется большее внимание по сравнению с периодом ледостава. Однако в последнее время прослеживается тенденция к увеличению количества научных проектов, направленных на изучение физических, химических и биологических процессов в водоемах, покрытых льдом [Salonen et al., 2009; Hampton et al., 2017]. Несмотря на то, что период ледостава является важным звеном годового цикла термического и газового режимов озер [Kirillin et al., 2012; Obertegger et al., 2017; Yang et al., 2017], важным этапом развития биоты водоемов [Bertillson et al., 2013; Salmi, Salonen, 2016; Yang et al., 2020], до сих пор гидрофизические и химико-биологические процессы в покрытых льдом озерах остаются малоизученными, главным образом в связи с рядом трудностей, возникающих при организации научных измерений на льду [Block et al., 2019]. Многие начинающие ученые лимнологи не имеют достаточного опыта проведения зимних полевых измерений. В данной лекции рассмотрены некоторые важные вопросы, касающиеся организации и проведения научных измерений на покрытых льдом водоемах.

**1. Планирование полевых измерений на льду: подбор экипировки, инструктаж по технике безопасности, предварительный выбор мест измерений, подготовка оборудования, логистические задачи.** При планировании полевых измерений на водоемах в зимний период нужно учитывать несколько важных моментов: научный персонал должен быть экипирован в соответствии с прогнозируемыми погодными условиями; все члены команды должны пройти инструктаж по технике безопасности и понимать порядок действий при наступлении чрезвычайных ситуаций; каждый член полевого отряда должен иметь медицинский допуск к полевым работам; места измерений должны быть выбраны заранее, с возможностью их корректировки в зависимости от условий на местности; измерительное оборудование должно быть заранее подготовлено; должны быть заранее продуманы маршруты к месту измерений; проведен расчет необходимого питания и воды, медикаментов; у полевого отряда должны быть средства связи; должен быть назначен командир полевого отряда. Ниже эти вопросы рассмотрены подробнее.

Для работы на льду необходима теплая и удобная одежда, которая не стесняет движений, непромокаема, защищает от низких температур и ветра: зимний комбинезон или зимний костюм с капюшоном, или теплый костюм-поплавок, теплое термобелье, теплые носки, шапка, которая полностью закрывает голову, специальные непромокаемые прочные перчатки (желательно иметь несколько пар перчаток) (рис. 1). Верхнюю одежду по возможности нужно подбирать ярких цветов – красную, оранжевую, так как эти цвета хорошо заметны на белом и сером фоне. При длительном нахождении на льду, особенно в солнечный день, необходимо использовать солнцезащитные очки, которые к тому же защищают и от ветра. Нужно помнить, что в холодную погоду с ветром важно хорошо защищать лицо, голову и шею, так как это области, через которые тело теряет значительное количество тепла. Хорошо иметь запасной комплект термобелья и носков, а при работе в удаленных от базы или от берега районах – полный комплект одежды и обуви (для возможности переодеться на случай падения в воду). Обувь должна быть водонепроницаемой или хотя бы водоотталкивающей. Очень полезным приспособлением являются наколенники, которые можно носить поверх брюк – они защищают ноги от травм в случае падения, а также защищают одежду от намокания при работе на коленях. При работе на мокром льду хорошо иметь обувь со встроенными небольшими шипами или резиновый слой с шипами, который можно надевать на подошву обуви.

Перед выездом к месту проведения измерений все участники полевых работ обязаны пройти инструктаж по технике безопасности при работах на льду. Назначается начальник или командир полевого отряда, который принимает решения по принципиальным вопросам и несет ответственность за жизнь и здоровье членов полевого отряда. В период полевых работ члены полевого отряда должны подчиняться решениям командира полевого отряда. По прибытии в район исследований нужно связаться с местным отделением МЧС для уточнения возможности проведения работ на льду. При работах в отдаленных районах необходимо организовать связь с ближайшим населенным пунктом на случай возникновения несчастных случаев и вызова помощи.



**Рис. 1.** Отбор проб на протоках дельты р. Лены. Апрель 2019 г.

**Fig. 1.** Sampling from channels in the Lena River delta. April 2019

При работах на льду необходимо выполнять ряд правил для того, чтобы минимизировать риск возникновения несчастных случаев, включая угрозу жизни и здоровью участников исследований. Одно из главных правил – одиночный выход на лед запрещен, даже в том случае, если измерительная станция находится всего в нескольких метрах от берега. Нужно стараться свести к минимуму работу в условиях плохой видимости – ночью, в туман, сильный снегопад,

метель. Решение, выходить ли на лед для измерений в условиях плохой видимости, должен принимать начальник полевого отряда, так как он несет ответственность за жизнь и здоровье членов полевого отряда.

При перемещении по льду к месту проведения измерений и обратно, а также в процессе измерений нужно принять меры, чтобы исключить проваливание под лед. В ледяном покрове озер, особенно крупных, могут встречаться трещины, полыньи (рис. 2), в некоторых местах толщина льда может быть заметно тоньше, чем в среднем по водоему, поэтому при перемещении по льду к месту измерений и обратно необходимо внимательно осматривать поверхность льда, соблюдать повышенную осторожность. В процессе измерений во льду делаются лунки, иногда достаточно большие, по размеру проруби (рис. 3). Находясь вблизи лунок и прорубей, нужно вести себя предельно осторожно, чтобы не провалиться в них.

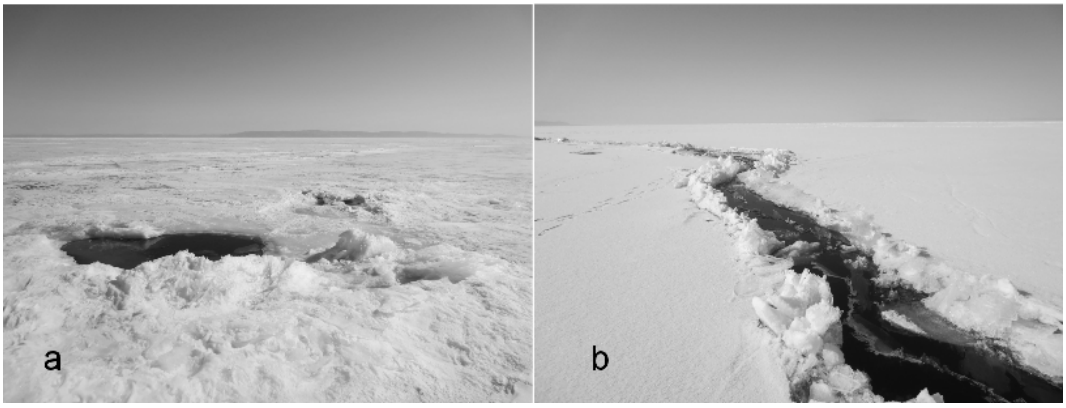



**Рис. 2.** a – полынья (a) и трещина (b) во льду озера Байкал, апрель 2014 г. (Такие трещины могут простираться на несколько сотен метров, иногда на несколько километров)

**Fig. 2.** a – polynya (a) and expansion crack (b), Lake Baikal, April 2014 (Such cracks can extend for several hundred meters, sometimes for several kilometers)




**Рис. 3.** a – большая прорубь размером 1,5 × 1,5 м. За прорубью видны блоки льда 30 × 30 × 40 см, извлеченные из воды; b **–** подготовка пропила во льду длиной 20 м для отбора проб зоопланктона сеткой. Онежское озеро, март 2017 г.

**Fig. 3.** a – Large, 1.5 x 1.5 m hole cut in the ice. Blocks of ice 30 x× 30 × 40 cm removed from the water are seen behind the hole; b – Sawing a 20-m-long trench through ice for taking zooplankton samples with a net. Lake Onego, March 2017

Наиболее опасным для здоровья и жизни человека при работах на льду является падение в воду; нужно помнить, что фатальное переохлаждение может произойти уже через 15–20 мин. нахождения человека в ледяной воде. Поэтому при падении в воду решающим фактором для сохранения жизни и здоровья человека является скорость его извлечения из воды. Зачастую провалившийся под лед не может самостоятельно выбраться из воды. Перед началом полевых работ необходимо

ознакомиться со способами помощи провалившимся под лед и методами самостоятельного спасения [Сайт МЧС России]. Если кто-то из команды исследователей провалился под лед, остальные должны принять все меры для помощи пострадавшему. Здесь не будем подробно рассматривать все необходимые при этом действия, исследователь обязан ознакомиться с ними заранее, до начала экспедиционного выезда. Главное, что нужно помнить, – нельзя паниковать, действовать надо слаженно, спокойно, но быстро.

Поскольку поверхность льда может быть очень скользкой, не менее опасным, чем падение в воду, может быть падение на лед, так как при этом человек может получить тяжелые травмы, переломы, вывихи, сотрясения. Поэтому по льду нужно передвигаться осторожно, не бегать, не скользить.

Еще одним распространенным видом травм при проведении измерений на льду являются повреждения кожи рук, вывихи пальцев, растяжения связок, которые можно получить в процессе проведения зондирований при работе с тяжелыми приборами, поэтому при проведении работ необходимо использовать защитные перчатки. Исследователи должны брать с собой на лед аптечку для оказания первой помощи при порезах и других травмах.

При работе с водой, особенно при низких температурах воздуха и сильном ветре, кожа рук может пострадать, поэтому наряду с использованием перчаток можно использовать защитный крем. При работе в сложных погодных условиях (низкие температуры воздуха, сильный ветер) необходимо так спланировать время нахождения исследователей на льду, чтобы избежать переохлаждения и обморожения.

Человеку, провалившемуся под лед или получившему травму, необходимо оказать первую помощь (переодеть, согреть, зафиксировать травмированную конечность, перевязать рану) и максимально быстро доставить его на берег для оказания медицинской помощи, при невозможности самостоятельной эвакуации – вызвать спасателей, постараться защитить пострадавшего от действия холода и ветра.

Для экстренной связи с берегом необходимо иметь средства связи: сотовые телефоны (там, где есть покрытие сети), спутниковые телефоны и рации. При работе в отдаленных районах нужно заранее согласовать график контрольных периодов связи с полевым отрядом и строго его придерживаться. Все средства связи должны быть заряжены, иметь дополнительные батареи или внешние источники питания. Средства связи, а также личные документы должны быть помещены в водонепроницаемые чехлы.

При планировании научных исследований на водоемах нужно заранее выбрать места измерений, основываясь на соображениях безопасности и используя весь имеющийся в наличии картографический материал и другую полезную информацию. Лучше выбирать места измерений вдали от тех районов озера, где толщина льда может быть намного меньше, чем в среднем по водоему. Более тонкий лед обычно встречается в местах впадения рек и ручьев, в местах сброса сточных вод, под мостами, в узких проливах между островами, вблизи зарослей тростника. Лучше заблаговременно наметить резервные точки для измерений на случай, если на местности окажется, что толщина льда на запланированных ранее участках непригодна для безопасного проведения измерений. Если визуальная оценка состояния льда на водоеме внушает опасения – от проведения измерений лучше отказаться или использовать для выезда на лед транспортные средства на воздушной подушке (при возможности).

Всё измерительное и вспомогательное оборудование должно быть заранее подготовлено, батареи питания должны быть заменены на новые, датчики откалиброваны. Нужно иметь достаточный запас тросов, веревок, изоленты, горюче-смазочных материалов, емкостей для отбора проб, необходимых химикатов и других расходных материалов.

На стадии планирования экспедиции должны быть заранее продуманы маршруты к месту измерений, проведен расчет необходимого питания и воды, медикаментов, у полевого отряда должны иметься средства связи, должен быть назначен командир полевого отряда.

**2. Типы льда, несущая способность снежно-ледяного покрова, принципы выбора мест на акватории водоема для безопасных измерений на льду.** В начальный период зимы при отрицательных температурах воздуха на водоемах устанавливается лед. Дальнейший рост льда, его толщина, структура, а в весенний период – таяние и разрушение определяются погодными условиями. Нужно помнить, что на малых лесных водоемах, защищенных от действия ветра, установление льда

происходит раньше, чем на больших по площади озерах, поэтому и толщина льда на водоемах, расположенных достаточно близко друг от друга, может заметно отличаться. Если установление льда происходит при безветренной погоде, то лед содержит небольшое количество пузырьков воздуха, частиц взвешенного вещества, он прозрачный, без трещин. Такой лед называется кристаллическим, и он наиболее прочный (рис. 4, a).

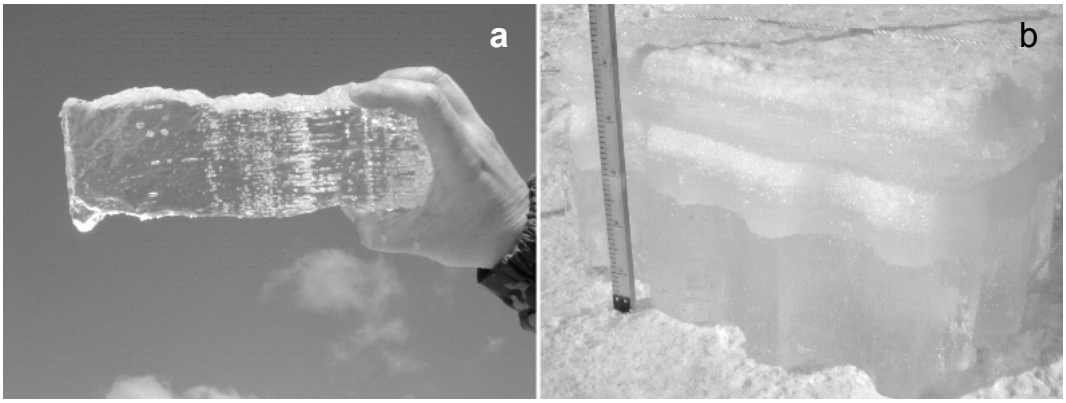



**Рис. 4.** a – кристаллический лед; b – блок льда, выпиленный из ледового покрова оз. Вендюрского в апреле 2005 г.:
нижняя часть – кристаллический лед, верхняя часть – несколько слоев белого льда, отличающихся по плотности и прозрачности

**Fig. 4.** a – crystalline ice; b – block of ice cut out of the ice cover of Lake Vendyurskoe in April 2005:
the lower part is crystalline ice; the upper part is several layers of white ice, differing in density and transparency

Если льдообразование происходит при ветровом воздействии, то образующийся лед содержит большое количество пузырьков воздуха, взвешенных частиц, он менее прозрачный и менее прочный. Если в начальный период зимы устанавливается холодная погода, толщина льда быстро увеличивается. Скорость нарастания льда при отсутствии снега на его поверхности определяется температурой воздуха: чем она ниже, тем быстрее нарастает кристаллический лед.

При выпадении большого количества снега скорость роста кристаллического льда резко снижается, так как снег изолирует лед от воздействия атмосферы. Под действием веса снега лед трескается. На его поверхность выступает вода, которая пропитывает снег. Постепенно влажный снег начинает промерзать, при этом образуется так называемый белый, или снежный лед. Он заметно менее прозрачный и менее прочный, чем кристаллический. Если пропитанный водой снег не успевает промерзнуть полностью, то между слоями кристаллического и белого льда может наблюдаться прослойка влажного снега [Ashton, 2011]. В течение зимы постепенно формируется многослойная структура льда (рис. 4, b), в котором может насчитываться несколько слоев, заметно отличающихся по прозрачности, плотности, прочности [Petrov et al., 2005].

Лед озер Арктической зоны часто очень толстый – 1,5–2 м, при этом слой плотного снега на поверхности льда может превышать 0,5–0,7 м (рис. 5). В таких условиях исследователям приходится прилагать немалые усилия, чтобы добраться до водной толщи водоемов.

Весной, по мере таяния, происходит не только уменьшение толщины льда, но и изменение его свойств, в первую очередь прочности. При таянии во льду образуются вертикальные каналы, по которым поднимаются и опускаются вода, пузырьки воздуха, лед становится заметно менее прочным. Структура кристаллического льда весной меняется, он легко распадается на вытянутые сегменты (рис. 6). Эти факторы нужно обязательно учитывать, выбирая период для организации научных наблюдений на покрытых льдом озерах.

Одно из главных условий проведения безопасных работ на льду – достаточная толщина и прочность льда. Согласно рекомендациям МЧС России, безопасной считается следующая толщина льда: 7 см для одного человека, 12 см для группы людей, 30–40 см для автомобиля [Сайт МЧС России]. Для проведения безопасных научных работ на водоемах толщина льда должна быть не менее 15–20 см, в конце зимы – не менее 40 см, при организации многодневного ледового лагеря – более 40 см.




**Рис. 5.** a – снежный покров на льду озера, о. Самойловский, дельта р. Лены; b – бурение лунок во льду проток р. Лены. Апрель 2019 г.

**Fig. 5.** a – snow cover on lake ice, Samoilov Island, Lena delta; b – drilling holes in the ice of a Lena River channel, April 2019

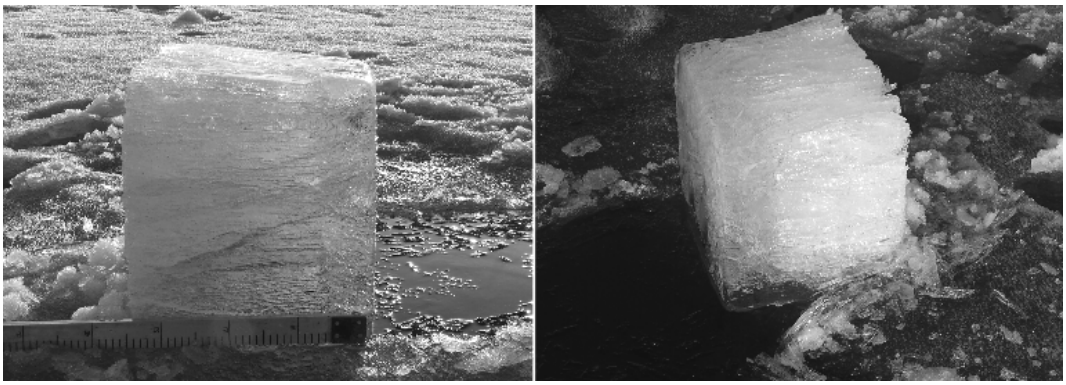


**Рис. 6.** Блок льда, выпиленный из ледового покрова оз. Вендюрского в апреле 2006 г. (видны вертикальные каналы и вытянутые сегменты во льду)

**Fig. 6.** A block of ice cut out of the ice cover of Lake Vendyurskoe in April 2006 (vertical channels and elongated segments are visible in the ice)

Если на водоемах района исследований уже начался процесс весеннего таяния, то стационарный лагерь на льду устанавливать небезопасно. При выборе мест проведения измерений, как уже упоминалось выше, нужно учитывать, что толщина льда в разных частях акватории озера может заметно отличаться, что прочность белого льда ниже, чем прочность кристаллического, и то, что при одинаковой толщине прочность льда в начальный период зимы больше, чем в период активного весеннего таяния.

**3. Организация стационарного лагеря на берегу и на льду. Организация научных работ на льду.** При планировании полевых работ может быть принято решение об организации стационарного лагеря на берегу водоема, в этом случае исследователи совершают выходы или выезды на акваторию озера для измерений в дневное время. Для перемещений по льду на большие расстояния удобно использовать снегоходы, квадроциклы. В стационарном лагере должно быть организовано питание членов полевого отряда, должны быть оборудованы места для отдыха и работы с приборами. При выездах на акваторию озера на длительное время (порядка нескольких часов) нужно обязательно брать с собой термосы с горячими напитками и запас питания. Также стационарный лагерь может быть организован на льду водоема для проведения многодневных измерений.

Список вспомогательного оборудования, необходимого для проведения измерений на льду, включает:

– GPS устройства, которые очень удобны для выхода на заранее запланированную точку на поверхности озер, для прокладывания маршрутов;

– ледобур и ледоруб – для высверливания во льду лунок или больших прорубей;

– пила для льда – для пропиливания льда между лунками;
– L-образный металлический стержень – для измерения толщины льда;
– совок или большая шумовка – для очистки воды в лунке от обломков льда;
– лопата для снега – для расчистки поверхности льда;
– сани – для перевозки измерительного и вспомогательного оборудования;
– фонарь;
– водонепроницаемые спички;
– компас;
– плавучая веревка длиной 15–30 м с петлей на одном конце и грузом в 0,5 кг на другом – для помощи людям, провалившимся под лед;
– полевые дневники;
– средства связи.

Важно помнить, что лезвия ледобура, ледоруба, пилы всегда должны быть закрыты защитным кожухом после завершения использования, иначе люди могут поскользнуться, упасть на лезвия и получить серьезные травмы. Не следует оставлять оборудование как вспомогательное, так и измерительное на льду, так как оно может провалиться в лунку, затеряться в глубоком снегу. Всё оборудование, которое в данный момент не используется, нужно складывать в специально отведенное для этого место, например на сани.

Сочетание низких температур и ветра может привести к обмерзанию измерительного оборудования, а иногда и к его повреждению. Чувствительное к низким температурам оборудование нужно после извлечения из воды помещать в теплое место до следующего использования, например в контейнер, заполненный водой, или термоящик.

При организации многодневного лагеря на льду нужно учитывать некоторые важные моменты, которые рассмотрим ниже.

Для начала нужно определиться с местом расположения лагеря, учитывая вопросы безопасности, а также близость к точкам измерений. Лучшим решением будет установить несколько палаток – отдельно для оборудования и работы с инструментами и для проживания (рис. 7).




**Рис. 7.** a – вид на стационарный ледовый лагерь, установленный на льду Петрозаводской губы Онежского озера в марте 2016 г.; b – палатка для персонала

**Fig. 7.** a – stationary camp set up on the ice of the Petrozavodsk Bay of Lake Onego in March 2016; b – tent for personnel

Палатки, установленные на льду водоемов, должны быть яркого цвета, а в ночное время должны освещаться осветительными приборами, чтобы их было хорошо видно издалека и чтобы другие люди (на снегоходах или другом транспорте) не могли случайно столкнуться с ними.

Для комфортного проживания можно использовать зимние палатки с печами. Внутри палаток лучше установить раскладные кровати. На дно палаток кладутся деревянные поддоны, на них – водостойкие маты, это поможет избежать таяния льда под палаткой и образования лужи внутри нее. Ориентация палаток должна производиться с учетом преобладающего направления ветра, так, чтобы ветер не дул во вход. В противном случае палатка будет быстро терять тепло, полог будет трудно открывать и закрывать, а при сильном ветре дверь может быть повреждена.

Для закрепления палаток на льду можно использовать ледовые якоря: просверлить отверстия во льду по периметру палатки, в каждое отверстие вставить доску длиной 30–40 см с привязанной к ее середине веревкой, доску нужно расположить подо льдом, а концы веревки вытащить на поверхность льда (веревка и доска образуют перевернутую букву Т), тросы палатки привязать к концам веревок.

Важно располагать палатки на некотором расстоянии друг от друга, чтобы не создавать большой нагрузки на лед. Периодически нужно контролировать, не происходит ли протаивания льда под палатками и при необходимости перемещать их на другое место.

**4. Особенности проведения измерений со льда. Закрепление и извлечение приборов.** Преимуществом зимних лимнологических работ является то, что измерения проводятся на устойчивой поверхности. Проводя измерения со льда, можно рассчитывать на стационарность точки измерений (при отсутствии дрейфа ледяных полей на крупных водоемах), в отличие от условий открытой воды, когда при измерениях с борта лодки или судна может происходить смещение прибора относительно предполагаемой точки измерений под действием ветра и течений. В условиях устойчивого ледяного покрова такой проблемы нет. В то же время при измерениях в зимний период лед, снег, низкие температуры создают некоторые ограничения для установки и эксплуатации научного оборудования.

Некоторые виды современного измерительного оборудования чувствительны к температуре окружающего воздуха и не могут эксплуатироваться в условиях низких температур. Некоторые современные методики измерений на покрытых льдом водоемах приведены в работе [Block et al., 2019]. Ниже приведены дополнительные полезные советы по работе с измерительным оборудованием при выполнении зимних исследований.

Закрепление приборов на поверхности льда, в толще льда и подо льдом имеет свои особенности. Места измерений рекомендуется пометить яркими флажками, можно обнести светоотражающей лентой, это поможет найти оборудование после снегопада, а также служит предупреждением для лыжников, рыбаков, что это место следует избегать (рис. 8, a).




**Рис. 8.** a – флажки показывают расположение станции измерений с приборами, помещенными под лед, после снегопада; b – станция радиационных измерений, установленная на круглом диске из светлого полистирола; c – оборудование закреплено на деревянной доске с изоляцией из полистирола, трос продевается через пластиковый шланг; d – изображение шланга в увеличенном масштабе

**Fig. 8.** a – Flags mark the location of underwater devices after snowfall; b – Station for radiation measurements installed on a round light-coloured polystyrene disk; c – Equipment tied to a wooden plank with polystyrene insulation, the rope runs through plastic hose; d – Zoom on the hose

Некоторое оборудование, например метеостанции, радиационные станции, устанавливают на штативы, треноги, другие деревянные или металлические конструкции (рис. 8, b, c). В солнечную погоду эти конструкции имеют тенденцию к нагреванию, что приводит к таянию льда под ними и опусканию этих конструкций в лед. При этом меняется положение приборов в пространстве, что может вносить погрешности в измеряемые величины. Например, отклонение прибора, измеряющего поток падающей солнечной радиации, всего на несколько градусов может внести заметные погрешности в измеряемые величины [Jakkila et al., 2009; Weiser et al., 2016]. Чтобы избежать этого или хотя бы отсрочить этот процесс, можно прокладывать между конструкцией и льдом толстый прочный пластик белого цвета.

При закреплении оборудования на льду и подо льдом можно использовать ледяные якоря, способ установки которых описан выше. Одной из основных проблем при установке научного оборудования на долгое время является вмерзание веревок в лед. При извлечении инструментов по окончании измерений существует высокий риск перерезания веревки ледорубом или пилой для льда и, как следствие, потери оборудования. Чтобы веревка не вмерзла в лед, можно использовать пластиковый шланг темного цвета, длина которого немного больше толщины льда (рис. 8, c, d). Веревку продевают через шланг в месте контакта со льдом. Это защищает веревку от вмерзания в лед и снижает риск случайного ее разрезания.

Некоторые приборы вмораживают в лед, например термокосы, измерители течений [Aslamov et al., 2014; Богданов и др., 2021]. Для того чтобы извлечь эти приборы, не повредив их, лучше вырубить блок льда (рис. 9), в который они вморожены, а затем осторожно откалывать куски льда или просто поместить оборудование в теплое место и подождать, пока лед растает.

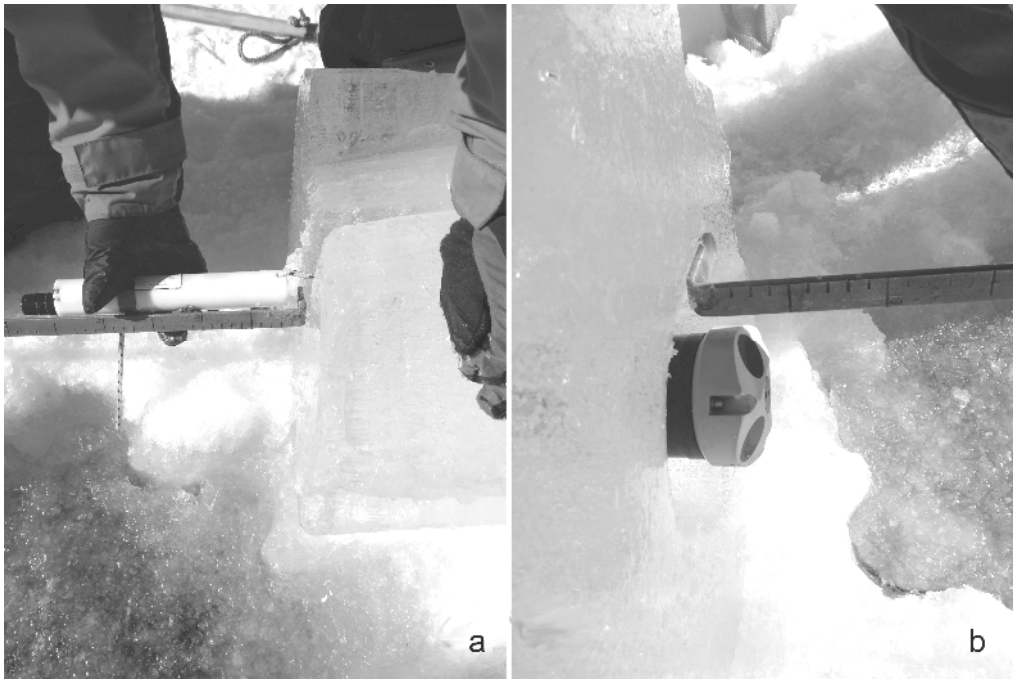



**Рис. 9.** Блоки льда, выпиленные из ледового покрова озера, с вмороженными в них измерителями температуры (a) и течений (b)

**Fig. 9.** Blocks of ice cut out of lake ice cover, with temperature (a) and current (b) measuring devices frozen into them

**Заключение.** Работа на льду – это всегда творческий процесс. Часто приходится решать какие-то необычные задачи, и решение нужно искать на месте. Например, на Онежском озере в марте 2017 г. для проведения специальных экспериментов в рамках проекта «Life under ice» потребовалась большая прорубь размером 1,5 × 1,5 м. Для начала по периметру будущей проруби были сделаны отверстия. Однако при толщине льда 40 см вынуть монолитную глыбу с такими размерами и весом – невыполнимая задача. На этом блоке была размечена сетка 30 × 30 см.

В каждой точке сетки были просверлены отверстия, а затем блок разрезали на куски с помощью пилы для льда. После с помощью L-образных металлических линеек для льда были извлечены эти более мелкие куски (см. рис. 3, а).

Работы на льду – зачастую тяжелый труд. В марте 2017 г. пробы зоопланктона нужно было собирать под поверхностью льда с использованием планктонной сети. Для этого во льду сделали пропил длиной 20 м. Это потребовало работы десяти человек в течение нескольких часов (см. рис. 3, б).

Мы надеемся, что наш опыт и предложенные решения, представленные выше, помогут начинающим исследователям в организации и проведении зимних лимнологических исследований.

*Полевые исследования на покрытых льдом озерах проведены при финансовой поддержке международных и российских грантов: международного мультидисциплинарного проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие подледных процессов посредством глобальных изменений», поддержанного фондом FEEL Foundation, "Fondation pour l'Etude des Eaux du Léman", гранта РФФИ 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата», а также грантов CNES TOSCA "LakeIce" and "LAKEDDIES" и CNRS-Russia IRN "TTS" CNES TOSCA "LakeIce".*

## Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные вопросы, которые нужно решить на этапе планирования экспедиции на покрытые льдом озера.
2. Какие типы льда формируются на водоемах и отличается ли их прочность?
3. Какие основные факторы уменьшают прочность льда?
4. Можно ли проводить измерения на льду водоемов одному в темное время суток в снегопад, имея при себе достаточный запас продовольствия, теплой одежды и сильный фонарь?
5. Как можно закрепить приборы на льду?
6. Можно ли организовать лагерь на льду вблизи места впадения ручья в озеро?

## Литература

*Богданов С. Р., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Тержевик А. Ю., Гавриленко Г. Г., Волков С. Ю., Ефремова Т. В., Кулдин Н. А., Кириллин Г. Б.* Расчет турбулентных напряжений в конвективно-перемешанном слое в мелководном озере подо льдом с использованием двух ADCP // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2021 (в печати).

Сайт МЧС России. URL: https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/bezopasnost-grazhdan/pravila-povedeniya-na-ldu-i-vyezd-na-perepravu, Дата обращения 27.02.2021.

*Ashton G. D.* River and lake ice thickening, thinning, and snow ice formation // Cold Reg. Sci. Technol., 2011. 68(1–2), 3–19. doi:10.1016/j.coldregions.2011.05.004.

*Aslamov I. A., Kozlov V. V., Misandrontsev I. B., Kucher K. M., Granin N. G.* Estimate of Heat Flux at the Ice-Water Interface in Lake Baikal from Experimental Data // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 457, Part 2: P. 982–985.

*Bertilsson S. et al.* The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes // Limnol. Oceanogr. 58: 1998–2012. 2013. doi:10.4319/lo.2013.58.6.1998.

*Block B. D., Denfeld B. A., Stockwell J. D., Flaim G., Grossart H.-P. F., Knoll L. B., Maier D. B., North R. L., Rautio M., Rusak J. A., Sadro S., Weyhenmeyer G. A., Bramburger A. J., Branstrator D. K., Salonen K., Hampton S. E.* The unique methodological challenges of winter limnology // Limnol. Oceanogr.: Methods. 2019. 17: 42–57. doi: 10.1002/lom3.10295

*Hampton et al.* Ecology under lake ice // Ecol. Letters. 2017. 20: 98–111. doi: 10.1111/ele.12699

*Jakkila J., Leppäranta M., Kawamura T., Shirasawa K., Salonen K.* Radiation transfer and heat budget during the ice season in Lake Pääjärvi, Finland // Aquat. Ecol. 2009. 43(3): 681–692. doi:10.1007/s10452-009-9275-2

*Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A. et al.* Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquat. Sci. 2012. 74: 659–682. https://doi.org/10.1007/s00027-012-0279-y

*Obertegger U., Obrador B., Flaim G.* Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy // Water Res. 2017. 53(8): 7234–7246. https://doi.org/10.1002/2017WR020599

*Petrov M. P., Terzhevik A. Y., Palshin N. I., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E.* Absorption of solar radiation by snow-and-ice cover of lakes // Water Res. 2005. 32(5): 496–504. doi: 10.1007/s11268-005-0063-7

*Salmi P., Salonen K.* Regular build-up of the spring phytoplankton maximum before ice-break in a boreal lake // Limnol. Oceanogr. 2016. 61(1): 240–253. https://doi.org/10.1002/lno.10214

*Salonen K., Leppäranta M., Viljanen M., Gulati R.* Perspectives in winter limnology: Closing the annual cycle of freezing lakes // Aquat. Ecol. 2009. 43: 609–616. doi:10.1007/s10452-009-9278-z

*Weiser U., Olefs M., Schöner W., Weyss G., Hynek B.* Correction of broadband snow albedo measurements affected by unknown slope and sensor tilts // Cryosphere. 2016. 10: 775–790. doi:10.5194/tc-10-775-2016

*Yang B., Young J., Brown L., Wells M.* High-Frequency Observations of Temperature and Dissolved Oxygen Reveal Under-Ice Convection in a Large Lake // Geophys. Res. Lett. 2017. 44(24): 12,218–12,226. https://doi.org/10.1002/2017GL075373

*Yang B., Wells M., Li J., Young J.* Mixing, stratification, and plankton under lake-ice during winter in a large lake: Implications for spring dissolved oxygen levels // Limnol. Oceanogr. 2020. https://doi.org/10.1002/lno.11543

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Здоровеннов Роман Эдуардович**
старший научный сотрудник, к.г.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com

**Кураев Алексей Вячеславович**
доцент, к.г.н.
Томский государственный университет,
пр. Ленина, 36, Томск, Россия, 634050

LEGOS 14, Ave. Edouard Belin, 31400
Toulouse, France, Université de Toulouse
эл. почта: kouraev@legos.obs-mip.fr

**Здоровеннова Галина Эдуардовна**
руководитель лаб. гидрофизики,
старший научный сотрудник, к.г.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com

**Федорова Ирина Викторовна**
доцент с возложенными обязанностями
зав. каф. геоэкологии и природопользования, к.г.н.
Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле
10-я линия, 33–35, Санкт-Петербург, Россия, 199034
Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле
эл. почта: i.fedorova@spbu.ru

## CONTRIBUTORS:

**Zdorovennov, Roman**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com

**Kouraev, Alexei**
Tomsk State University
36, Lenin Ave., 634050,
Tomsk, Russia

LEGOS 14, Ave. Edouard Belin, 31400
Toulouse, France, Université de Toulouse
e-mail: kouraev@legos.obs-mip.fr

**Zdorovennova, Galina**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com

**Fedorova, Irina**
St. Petersburg State University,
Institute of Earth Sciences
33–35, 10th Line, 199034,
St. Petersburg, Russia
e-mail: i.fedorova@spbu.ru

УДК 556.078:532.517.4

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРОФИЛОГРАФОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

**С. Р. Богданов, Р. Э. Здоровеннов, Н. И. Пальшин, Г. Э. Здоровеннова**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,*
*ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

**Аннотация.** В лекции представлены основные методы, позволяющие осуществлять расчеты гидрофизических параметров на основе данных, получаемых при использовании акустических допплеровских профилографов скорости (ADCP). Проведен сравнительный анализ возможностей различных модификаций ADCP, отличающихся количеством и конфигурацией лучей, несущей частотой, режимом обработки данных. Представлен короткий обзор существующих методик расчета профилей средней скорости, а также параметров турбулентности; проанализированы используемые в их рамках допущения; установлены ограничения на пределы их использования. Особое внимание уделено оценкам турбулентных напряжений, включая новейшие методы расчета всех шести компонент матрицы напряжений. В том числе представлена оригинальная разработка авторов, основанная на использовании специальной конфигурации двух жестко связанных профилографов с одной или несколькими точками пересечения лучей. Детально обсуждены особенности постановок соответствующих опытов, выбора рабочих параметров и режимов работы приборов, а также расчетного алгоритма. В качестве примера апробации методов и планирования соответствующих экспедиционных исследований приведены результаты специальных натурных экспериментов по измерению температуры воды, уровня подледной облученности и компонент скорости в конвективно-перемешанном слое покрытых льдом озер. Полученные данные позволяют рассчитать не только интенсивности пульсаций вдоль трех ортогональных осей, но и недиагональные компоненты тензора Рейнольдса. С использованием условия однородности средней скорости по горизонтали получены количественные результаты, описывающие энергетику процессов в период весенней подледной конвекции: рассчитана скорость диссипации кинетической энергии, изучена корреляция энергии турбулентности с интенсивностью накачки (через поток плавучести), произведена оценка параметров крупномасштабной анизотропии. Приведен качественный анализ параметров и динамики энергосодержащих структур, развивающихся в конвективном слое небольших покрытых льдом озер весной.

**Ключевые слова:** бореальное озеро; температура воды; подледная радиация; поток плавучести; скорости течений; конвективно-перемешанный слой; акустические допплеровские профилографы; тензор турбулентных напряжений; анизотропия турбулентных пульсаций.

# ADCP INSIGHT INTO THE HYDROPHYSICS OF GEOPHYSICAL CURRENTS

**S. R. Bogdanov, R. E. Zdorovennov, N. I. Palshin, G. Z. Zdorovennova**

*Northern Water Problems Institute,*
*Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

**Summary.** This paper presents some key methods which are widely used for deriving hydrophysical parameters from raw ADCP data. The capabilities of ADCP versions with different numbers of beams, carrier frequencies, and operational settings are compared. Primary attention is paid to the methods of turbulence stress estimation. A short overview of the traditional methods, their application areas and limitations is followed by the presentation of the new method, which enablesderivation of all six components of the stress matrix. The method is based on the use of a pair of ADCPs with one or more points of intersection of the beams. The corresponding experimental setup, the choice of regime parameters and computation algorithms are discussed in detail. The method was validated by carrying out a special experiment, which included

measurements of the water temperature, the level of under-ice irradiation, and velocity components in the convectively mixed layer of ice-covered boreal lakes. The data obtained as a result of the experiment enables calculations of the intensities of the pulsations along three orthogonal axes, as well as the off-diagonal components of the Reynolds tensor. The energetics of the processes occurring during the period of spring under-ice convection was studied under the horizontal homogeneity assumption. The anisotropy of turbulent pulsations was calculated, and the correlation of turbulence energy dissipation with the energy production (through the buoyancy flux) was described. Finally, the paper presents a qualitative analysis of the parameters and dynamics of energy-containing structures developing in the convective layer of small ice-covered lakes in spring.

**Keywords:** boreal lake; water temperature; under-ice radiation; buoyancy flux; current velocities; convectively mixed layer; acoustic Doppler profilers; turbulent stress tensor; anisotropy of turbulent pulsations.

**Тема лекции.** «Использование акустических профилографов для изучения гидрофизических параметров геофизических течений».

**Цель.** Ознакомление учащихся с современными методами изучения гидрофизических параметров геофизических течений.

**Задачи.**

1. Продемонстрировать возможности современной приборной базы для изучения геофизических течений.

2. Описать натурные эксперименты по измерениям параметров течений в покрытом льдом озере.

3. Показать этапы обработки данных ADCP.

4. Ознакомить учащихся с представлениями о мелкомасштабной структуре турбулентности, локальной изотропности, методе структурных функций, крупномасштабных пульсациях.

5. По экспериментальным данным, полученным в период весенней подледной конвекции, выполнить анализ структуры конвективно-перемешанного слоя (КПС) и произвести расчеты его основных параметров.

**План изложения материала.**

Введение.

1. Материалы и методы. Объекты исследования. Приборная база. Описание экспериментов.

2. Средняя скорость.

3. Мелкомасштабная структура турбулентности. Локальная изотропность и метод структурных функций.

4. Крупномасштабные пульсации. Турбулентные напряжения.

Заключение.

## Изложение материала

**Введение.** Акустические допплеровские измерители скорости (ADCP), впервые использованные в радарной метеорологии [Lhermitte, 1968, 1983; Lohrmann et al., 1990], начиная с 1990-х гг. активно применяются в лабораторных и натурных геофизических исследованиях разнообразных водных объектов [Howarth, Souza, 2005; Guerra, Thomson, 2017; Kirillin et al., 2020]. Принцип их работы основан на измерениях допплеровского смещения $\Delta f$ частоты между импульсным ультразвуковым сигналом с несущей частотой $f$ и его отражением (normal mode) или сдвига фаз между двумя последовательными импульсами (pulse-coherent mode). В обоих случаях измеряемые величины определяются величиной компонент $\{b_i\}$ скорости вдоль лучей, совпадающих с направлениями излучения сигналов (например, для режима normal mode: $\Delta f_i = 2 f b_i/c$; $c$ – скорость звука), что позволяет рассчитать $\{b_i\}$ непосредственно.

Важно отметить, что прибор позволяет определить значения лучевых скоростей в серии точек (точнее, слоев малой толщины, cells, рис. 1, А[8]), расположенных на лучах, что и обусловливает

[8] Рис. 1 представлен материалами открытого доступа, доступными, в частности, на сайтах производителей по ссылкам: https://docuri.com/download/adcp-gauge_59ae4980f581710a6201780a_pdf,https://www.nortekgroup.com/assets/documents /ComprehensiveManual_Oct2017_compressed.pdf)

возможность профилирования, т. е. отыскания зависимости гидродинамических параметров от глубины. Диапазон сканируемых глубин при этом определяется несущей частотой (обычно 0,5–3 МГц) сигнала, он существенно уменьшается (от нескольких сотен метров до нескольких метров) при увеличении частоты *f*. При этом дискретность измерений скорости вдоль каждого луча может варьироваться в широких пределах – от сантиметров до метров. Для приборов с расходящимися лучами непосредственно перед излучателем располагается небольшая (~ 10 см) «слепая» зона (blanking region), в которой измерения скорости затруднены.

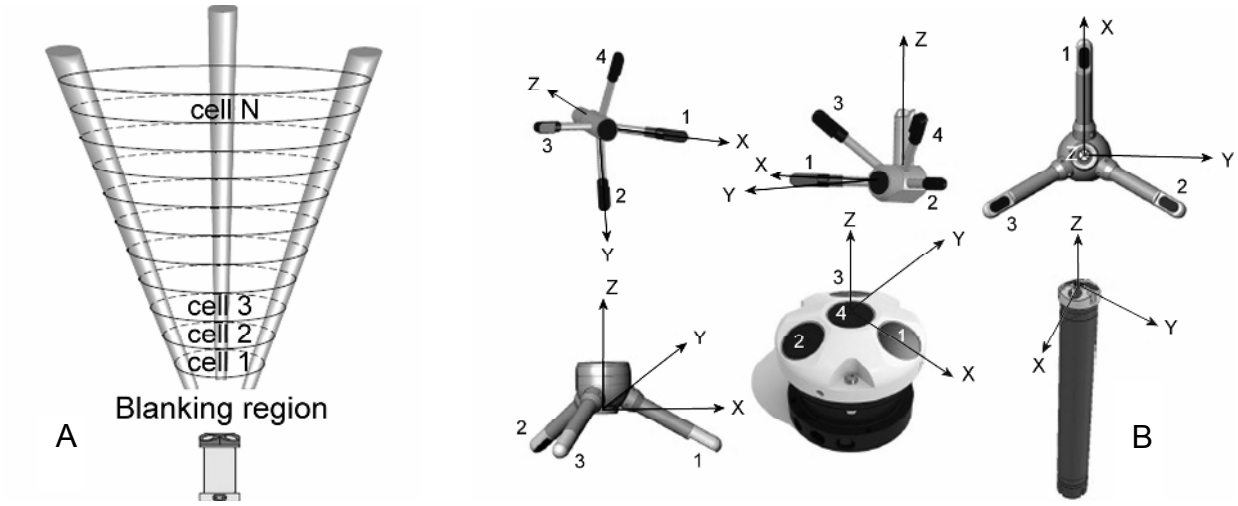



**Рис. 1.** Геометрия сканирования водной толщи 3-лучевым прибором (A); линейка велосиметров и профайлеров различной конфигурации (B)

**Fig. 1.** The geometry of water column scanning by 3-beam ADCP (A); the set of velocimeters and profilers with different beam configuration (B)

По характеру импульсных сигналов различают два режима работы. В первом – continuous – используются одиночные импульсы, во втором (обычно ориентированном на изучение турбулентности) – пакеты (bursts) одиночных импульсов (pings). Временная дискретность сигналов в обоих случаях определяется спецификой задачи.

Линейка этих приборов достаточно разнообразна (рис. 1, B). Версии отличаются количеством лучей (от 3 до 5) и их ориентацией. В варианте «велосиметр» используются пересекающиеся лучи; при этом за счет их «фокусирования» измерения производятся в весьма малом ограниченном объеме, что дает возможность по трем измеренным компонентам рассчитать мгновенную скорость в намеченной «точке». В приборах с расходящимися лучами короткие ультразвуковые импульсы симметрично расходятся узкими пучками под некоторым углом $\alpha_0$ к вертикали. В простейшей – трехлучевой – конфигурации (рис. 3) этот угол обычно составляет 25º. Всё большее распространение получают также 4-лучевые приборы (Janus), с двумя симметричными парами лучей, а также 5-лучевые Janus+, с дополнительным вертикальным лучом. Угловая разнесенность лучей в версиях Janus обычно несколько меньше, чем в стандартной 3-лучевой версии: $\alpha_0 = 20º$.

В общем случае профилографы с расходящимися лучами не позволяют определить скорость в какой-то заданной точке и тем более осуществить профилирование: непосредственно измеряется лишь одна компонента вектора скорости в *разных* точках. Важным исключением, однако, являются горизонтально однородные потоки, к которым в известном приближении можно отнести многие геофизические течения. В этом случае по трем измеренным «лучевым» компонентам можно рассчитать среднюю скорость для каждого вертикального слоя и, соответственно, профиль средней скорости по глубине. Именно эта возможность, наряду с достаточно высокой точностью измерений и простотой использования, обусловливает широкое использование данной версии приборов в океанологических и лимнологических исследованиях.

Спектр использования ADCP существенно расширился за последние два десятилетия. А именно, как было показано в работах [Lohrmann et al., 1990; Lorke, Wüest, 2005; Wiles et al., 2006], при выполнении условия горизонтальной однородности потока и должным образом выбранной процедуре осреднения [Wiles et al., 2006] показания прибора могут служить основой для расчета не только средней скорости, но и некоторых параметров турбулентности.

Соответствующие задачи включают изучение мелкомасштабной структуры поля скорости с оценками скорости диссипации энергии ε на основе анализа квадратичных структурных функций поля скорости [Wiles et al., 2006] или спектров в инерционном интервале [Lorke, Wüest, 2005]. Также исследуются параметры крупномасштабных возмущений и соответствующие слагаемые в уравнении баланса турбулентной энергии. При этом основным объектом изучения являются компоненты $\rho\langle u_i' u_j' \rangle$ Рейнольдсова тензора турбулентных напряжений (в дальнейшем, если не оговорено особо, этот термин используется для «кинематической версии» $\langle u_i' u_j' \rangle$ этого тензора), где ρ – плотность жидкости, $u_i'$, $u_j'$ – пульсационные компоненты скорости в ортогональной системе координат.

В следующих разделах описанные выше методы расчета различных гидродинамических параметров будут представлены последовательно и обсуждены более подробно. При этом особое внимание будет уделено обсуждению пределов их применимости. Объекты исследования при использовании таких методов весьма разнообразны: от мощных приливных течений (где критерий Рейнольдса достигает значений $10^8$) до относительно слабых потоков со спорадической турбулентностью.

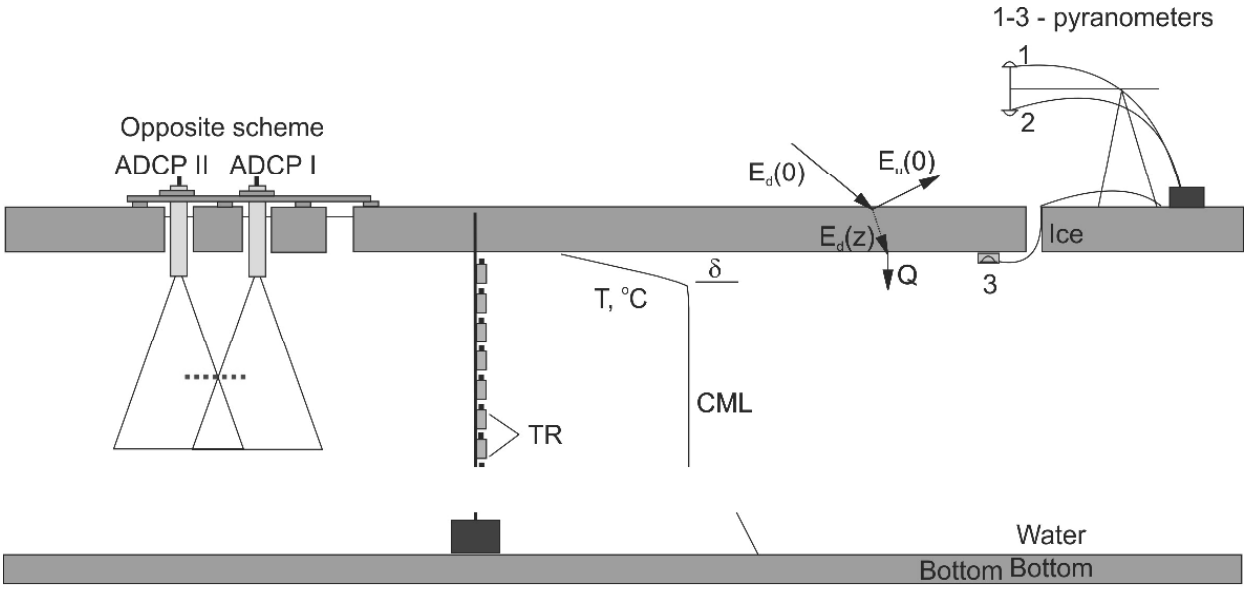
В данной работе в качестве основного объекта, выбранного для иллюстрации расчетных методик, выбран конвективно-перемешанный слой (КПС), возникающий в покрытых льдом озерах вследствие радиационного прогрева. Такой выбор обусловлен как приоритетами исследований лаборатории гидрофизики ИВПС, так и тем обстоятельством, что период существования КПС является важным звеном годового цикла озера и параметры КПС во многом определяют особенности развития биоты.

В основном будут проанализированы данные, полученные в ходе полевых работ на Вендюрском озере и в Петрозаводской губе Онежского озера в 2016–2020 гг.

**1. Материалы и методы. Объекты исследования. Приборная база. Описание экспериментов.** Подледная конвекция возникает как результат гравитационной неустойчивости в верхнем слое водной толщи. Обычно происходит в период схода снежного покрова: поток солнечной радиации проникает сквозь толщу льда и вызывает неравномерный прогрев воды. В типичных для Фенноскандии водоемах максимальная толщина льда в разные годы достигает 0,4–0,8 м [Zdorovennov et al., 2013], однако в отсутствие снега на поверхности льда поток радиации сквозь его нижнюю поверхность может достигать значений 100 Вт/м$^2$ [Bogdanov et al., 2019]. Процесс начинается обычно в конце марта – начале апреля; его продолжительность существенно зависит от погодных условий и для мелководных озер варьируется в пределах 2–6 недель. В крупных глубоких озерах продолжительность периода конвекции может достигать 2–3 месяцев [Austin, 2019].

Комплексные исследования КПС в Петрозаводской губе проводились 12–24 марта 2016 г. и 12–21 марта 2017 г., на оз. Вендюрском – 9–13 апреля 2016 г. и 27 марта – 6 апреля 2020 г. Помимо двух акустических профилографов (Aquadopp Profiler HR 2 MHz, Nortek, Norway) измерительные комплексы включали радиационную станцию и термокосы. На рис. 2 представлена схема установки приборов на льду озер и в водной толще, а также конфигурация лучей двух ADCP при разных способах их взаимного расположения.

Особенности структуры водной толщи в период конвекции наглядно иллюстрируют вертикальные температурные профили (схематически представлены на верхней панели рис. 2); на них хорошо прослеживаются три основных слоя: подледный градиентный (толщиной δ до 0,5 м), КПС и придонный стратифицированный. С течением времени температура КПС растет, достигая значений 4 ºС к моменту взлома льда. Одновременно нижняя граница КПС заглубляется, и на небольших озерах конвекция может достигать дна.



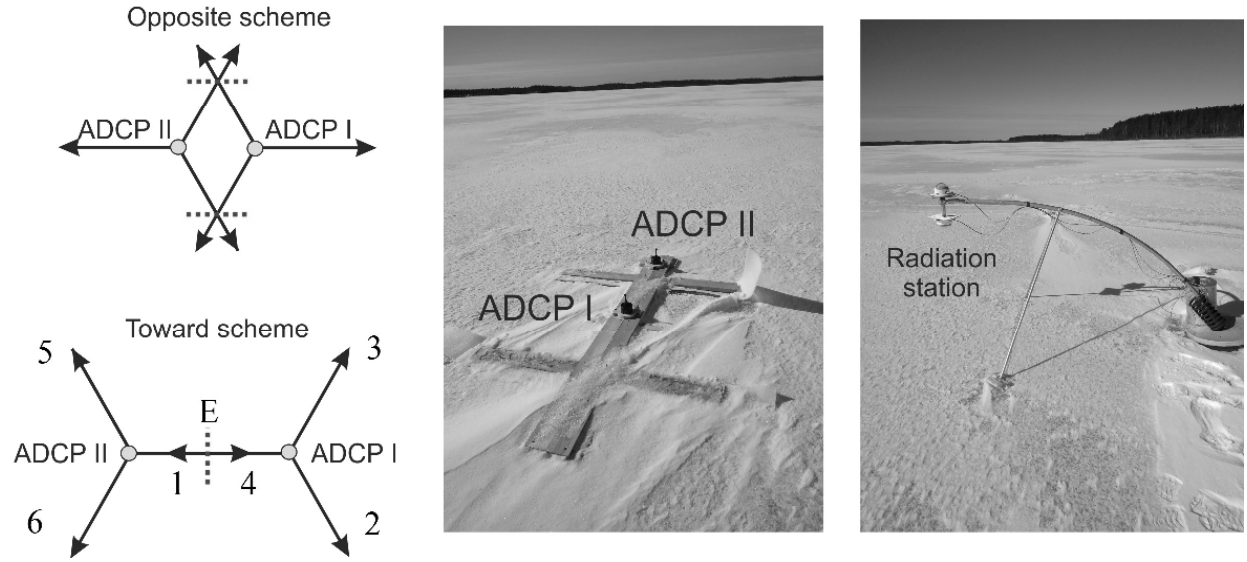




**Рис. 2.** Схема постановки приборов измерительного комплекса на льду озер. Для постановки Towards индексами 1, 2, 3 обозначены лучи первого прибора, 4, 5, 6 – второго; при этом лучи 1 и 4 лежат в плоскости *XZ*. Фотографии приборов, закрепленных на льду оз. Вендюрского в апреле 2020 г.

**Fig. 2.** Experimental setup on lake ice. The numbering of beams for the Towards configuration is 1, 2, 3 for the first device and 4, 5, 6 for the second device. Beams 1 and 4 lie in the plane *XZ*. Images of devices deployed on Lake Vendyurskoe ice in April 2020

**2. Средняя скорость.** Выбирая ортогональную систему *XYZ*, жестко связанную с прибором (рис. 3), лучевые компоненты скорости после простых тригонометрических вычислений можно непосредственно выразить через ортогональные компоненты скорости ($u_x$, $u_y$, $u_z$) в соответствующей точке:

$$\begin{cases} b_1 = u_x(C)\sin\alpha_0 + u_z(C)\cos\alpha_0; \\ b_2 = -u_x(B)\dfrac{1}{2}\sin\alpha_0 + u_y(B)\dfrac{\sqrt{3}}{2}\sin\alpha_0 + u_z(B)\cos\alpha_0; \\ b_3 = -u_x(A)\dfrac{1}{2}\sin\alpha_0 - u_y(A)\dfrac{\sqrt{3}}{2}\sin\alpha_0 + u_z(A)\cos\alpha_0. \end{cases} \quad (1)$$

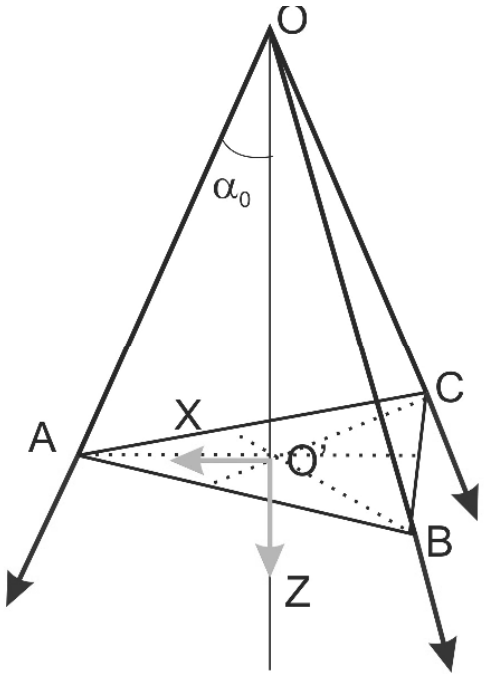



**Рис. 3.** Конфигурация лучей и система координат ADCP в постановке downlooking

**Fig. 3.** Beams configuration and ADCP-connected reference system. Downlooking orientation

Аналогичные соотношения могут быть записаны и для лучевых компонент второго прибора в соответствующих точках *D*, *E*, *F*. При этом в общем случае правые части уравнений включают 15 неизвестных – компоненты скорости в точках измерений, и шести уравнений недостаточно для их определения. Однако приведенная система уравнений становится рабочим инструментом в достаточно распространенном при изучении геофизических течений случае, когда течение можно считать локально однородным в горизонтальной плоскости. Для таких случаев точки *A*, *B*, *C*, *D*, *E, F* можно считать достаточно близкими в том смысле, что расстояние между ними существенно меньше горизонтального масштаба, характеризующего изменение усредненных параметров течения. При этом, в частности, компоненты средней скорости в разных точках можно считать одинаковыми, например $< u_x(A) > = \ldots = u_x(F) > = U_x$, и неизвестными остаются лишь три величины ($U_x$, $U_y$, $U_z$). Здесь и в дальнейшем угловые скобки используются для обозначения усредненных по времени величин.

Система (1) в силу линейности сохраняет свой вид и для усредненных величин, так что три компоненты средней скорости в системе *XYZ* вычисляются с использованием уравнений системы (1), записанных для средних значений $< b_i >$ лучевых компонент, например:

$$\begin{pmatrix} <b_1> \\ <b_2> \\ <b_3> \end{pmatrix} = \sin\alpha_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & ctg\alpha_0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & ctg\alpha_0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & ctg\alpha_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

Матрица *A* в правой части уравнения (2) однозначно определяется конструктивным углом $\alpha_0$. Обратная ей матрица $T = A^{-1}$, называемая трансформационной, позволяет, в соответствии с (2), непосредственно рассчитать компоненты ($U_x$, $U_y$, $U_z$) средней скорости по вычисленным средним значениям $< b_i >$ лучевых компонент.

Существенную роль при обработке данных и вычислении средней скорости играет выбор масштаба *T* временно́го осреднения. Обычно в качестве минимального значения *T* используется характерное время $\tau$ (turnover time) релаксации энергосодержащих структур перемешанного слоя. Расчет величины $\tau$, в свою очередь, производится на основе оценок характерного размера $l_c$ (интегральный масштаб турбулентности) и скорости $w_c$ пульсаций в энергосодержащем интервале. При изучении КПС для величины $l_c$ в качестве определяющего параметра используется толщина конвективного слоя [Deardorff, 1970] $h_C = (h_{CML}-\delta)$.

Характерный масштаб $w_c$ пульсационных скоростей обычно отождествляется с так называемой конвективной скоростью $w^*$, определяемой по негативному потоку плавучести $B_R$ [Deardorff, 1970]: $w^* = (B_R h_C)^{1/3}$. В случае, когда гравитационная неустойчивость создается за счет объемного поглощения солнечной радиации $H(z)$ (Вт/м$^2$), величина $B_R$, характеризующая накачку конвективной энергии в вертикально однородном слое $h_C$, определяется соотношением [Mironov et al., 2002]:

$$B_R = \beta[I(\delta) + I(h_{CML}) - \frac{2}{h_c}\int_{\delta}^{h_{CML}} I(z)dz \int_{\delta}^{h_{CML}} I(z)dz],$$

где $I = H/(c_p\rho)$ – кинематический поток солнечной радиации (К м/с), $\beta = \alpha_T g$ – коэффициент плавучести, $\alpha_T$ – коэффициент термического расширения; $\rho$ и $c_p$ – плотность и удельная теплоемкость воды при постоянном давлении.

Зависимость потока $I$ от глубины в простейшем случае аппроксимируется экспонентой с коэффициентом экстинкции γ постоянным по спектру, времени и глубине: $I(z) = I(\delta)e^{-\gamma z}$. В этом случае выражение для $B_R$ преобразуется к виду:

$$B_R = \beta I(\delta)[1 + \exp(-\gamma h_c) - \frac{2}{\gamma h_c}(1 - \exp(-\gamma h_c))]. \quad (3)$$

Расчеты $B_R$ и $w^*$ для Вендюрского озера осуществлялись с использованием значения $\gamma \approx 1{,}0$ м$^{-1}$ [Volkov et al., 2019].

При обработке опытных данных по измеренным значениям параметров $h_{CML}$ и δ был произведен расчет толщины $h_C$ конвективного слоя и, по формуле (3), конвективной скорости $w^*$. Суточные максимумы $w^*$ для случая Вендюрского озера в различных экспериментах варьировались в диапазоне (0,9–2,7) мм/с. Соответственно, для времени релаксации энергосодержащих структур $\tau = h_c / w^*$ была получена оценка снизу; ее значение варьировалось в диапазоне (30–50) мин. Последняя оценка в дальнейшем использовалась как основа при вычислении средних значений: в качестве базового масштаба $T$ временно́го осреднения использовался интервал 100 мин.

Одно из преимуществ использования двух жестко связанных приборов ADCP заключается в возможности непосредственной проверки условия горизонтальной однородности для средней скорости. В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены результаты такой проверки для глубины 1,35 м по данным экспериментов на Вендюрском озере. Зависимости компонент $U_x$, $U_y$ и $U_z$ от времени, рассчитанные по отдельности для каждого прибора на всем представленном временно́м интервале, практически совпадают в пределах статистической погрешности, что позволяет принимать условие горизонтальной однородности средней скорости.

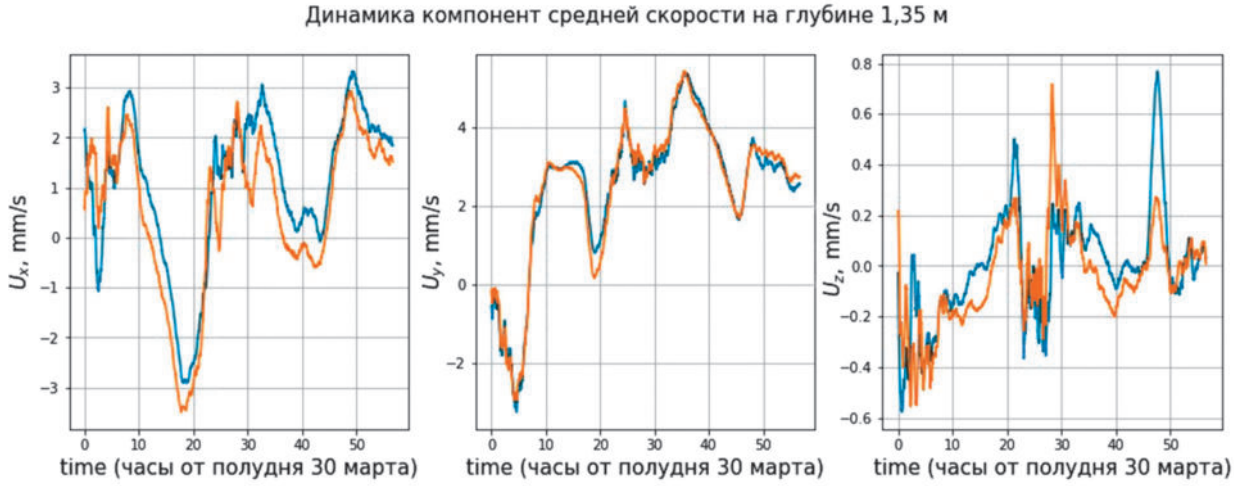



**Рис. 4.** Зависимость компонент средней скорости $U_x$, $U_y$ и $U_z$ от времени, рассчитанная по показаниям двух ADCP на глубине 1,35 м в оз. Вендюрском. Ноль горизонтальной оси соответствует полудню 30 марта 2020 г.

**Fig. 4.** Time-dependence of mean velocity components $U_x$, $U_y$ , and $U_z$ calculated from coupled ADCP data from 1.35 m depth in Lake Vendyurskoe, March 2020. Count-off time is noon, March 30, 2020

После выполнения расчета средней скорости для всех доступных глубин в зоне сканирования можно осуществить профилирование и провести анализ временной изменчивости поля средней скорости. Примеры эволюции таких профилей приведены на рис. 5, по данным измерений в Петрозаводской губе 18–20 марта 2016 г. [Bogdanov et al., 2019]. Изменение всех компонент скорости со временем происходит весьма сложным образом, однако расчеты иллюстрируют определенную упорядоченность потока и наличие в нем квазистационарных структур – энергосодержащих конвективных ячеек.

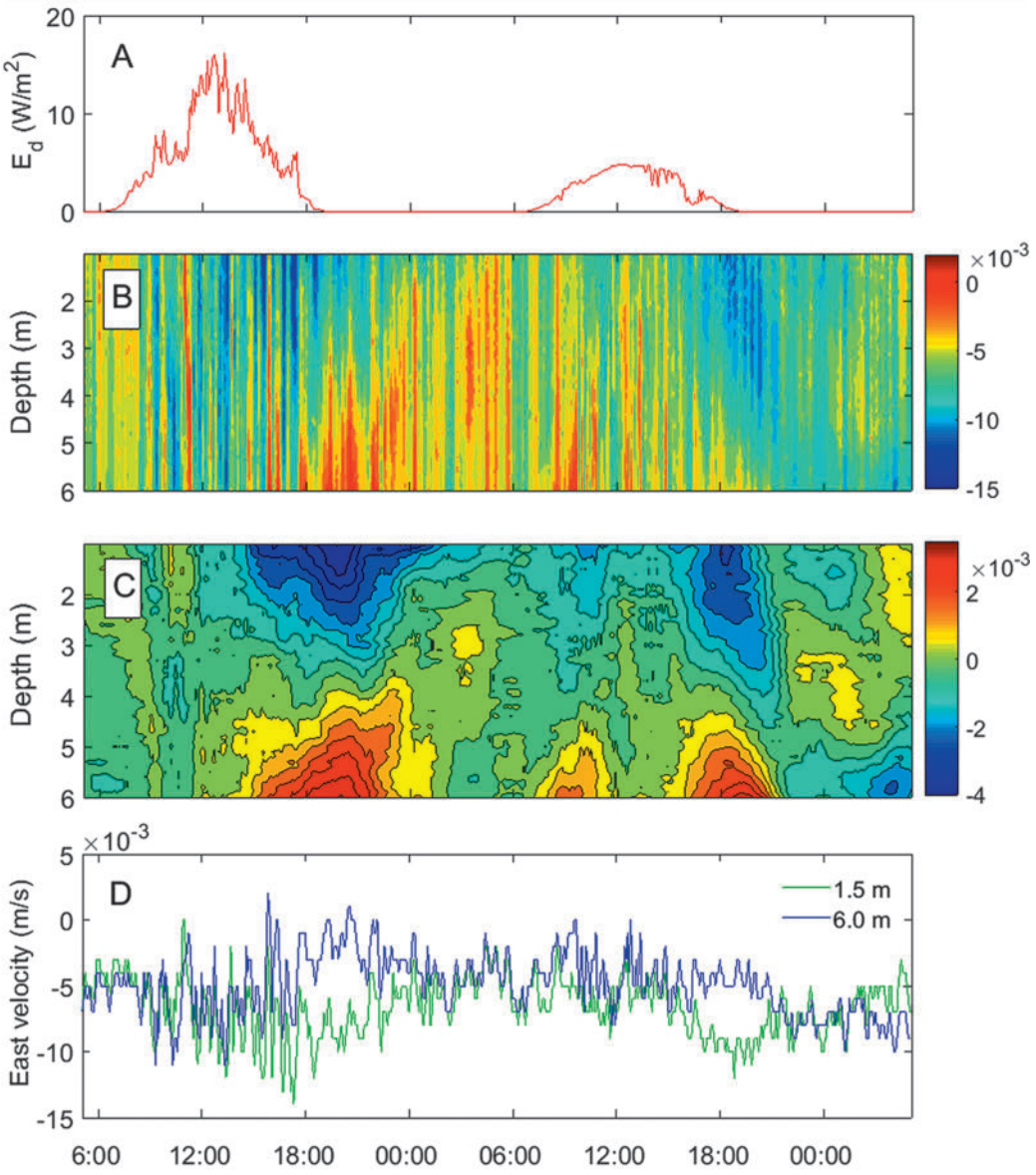



**Рис. 5.** Изменение во времени (A) подледной радиации; (B) восточной компоненты скорости; (C) отклонения осредненной по промежутку 100 мин. восточной компоненты скорости от среднего по глубине значения; (D) восточной компоненты скорости для двух различных глубин (по данным измерений в Петрозаводской губе Онежского озера с 18 по 20 марта 2016 г.)

**Fig. 5.** Temporal variations of (A) under-ice radiation; (B) east velocity component; (C) deviations of east velocity component averaged over 100 min from depth-averaged value; (D) east velocity component dynamics for different depths (Based on measurements in Petrozavodsk Bay, Lake Onego on March 18–20, 2016)

Выявление подобных квазидетерминированных структур и оценка их параметров могут быть также осуществлены с использованием прогрессивно-векторных диаграмм и годографов скорости. Детальное описание соответствующих методов представлено в работах [Волков и др., 2019; Bogdanov et al., 2019].

**3. Мелкомасштабная структура турбулентности. Локальная изотропность и метод структурных функций.** К недостаткам акустического профилографа относится тот факт, что с его помощью можно производить измерения лишь одной компоненты вектора скорости, определяющей проекцию этого вектора на направление соответствующего луча. Однако, с другой стороны,

именно эта особенность прибора обусловливает возможность непосредственного расчета такой важной характеристики турбулентности, как продольная структурная корреляционная функция $D_{LL}$. Выбирая на любом из лучей две точки A и A', эту функцию можно представить в виде:

$$D_{LL} = < (b_i'(A') - b_i'(A))^2 >. \quad (4)$$

Для достаточно развитой турбулентности в области, где выполняется условие локальной однородности и изотропности, функция $D_{LL}$ имеет универсальный вид и, в частности, в пределах так называемого инерционного интервала ее зависимость от расстояния $r = AA'$ описывается Колмогоровским соотношением («закон 2/3») [Monin,Yaglom, 2013]:

$$D_{LL}(r) = C\varepsilon^{2/3} r^{2/3};\ r_d << r >> L. \quad (5)$$

Здесь ε – скорость диссипации кинетической энергии, $r_d = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ – Колмогоровский диссипативный масштаб, $\nu$ – кинематическая вязкость, $L$ – характерный внешний масштаб, $C$ – константа со значением, близким к 2.1 [Chandrasekhar, 1950; Jabbari et al., 2015, 2016]. Уравнение (5) позволяет произвести непосредственный расчет важного параметра ε по известным значениям лучевых компонент скорости, после усреднения выражения в правой части соотношения (4). В настоящее время такой метод оценки величины ε является одним из наиболее распространенных при изучении геофизических течений [Wiles et al., 2006; Mohrholz et al., 2008; Lucas et al., 2014].

Расчеты величины ε в толще КПС были выполнены по данным измерений на обоих озерах. В качестве примера на рис. 6 представлены семейства структурных функций, полученные при обработке данных ADCP в апреле 2016 г. на Вендюрском озере, для различных лучей и глубин [Volkov et al., 2019]. Несмотря на относительно слабую энергетику процесса и высокий уровень шума, кривые демонстрируют подобие формы, и при использовании логарифмических осей в большинстве случаев удается идентифицировать линейный участок с наклоном 2/3, в соответствии с (6). Для получения количественных оценок структурные функции, рассчитанные для отдельных лучей, усреднялись. Некоторые результаты расчетов представлены в табл.

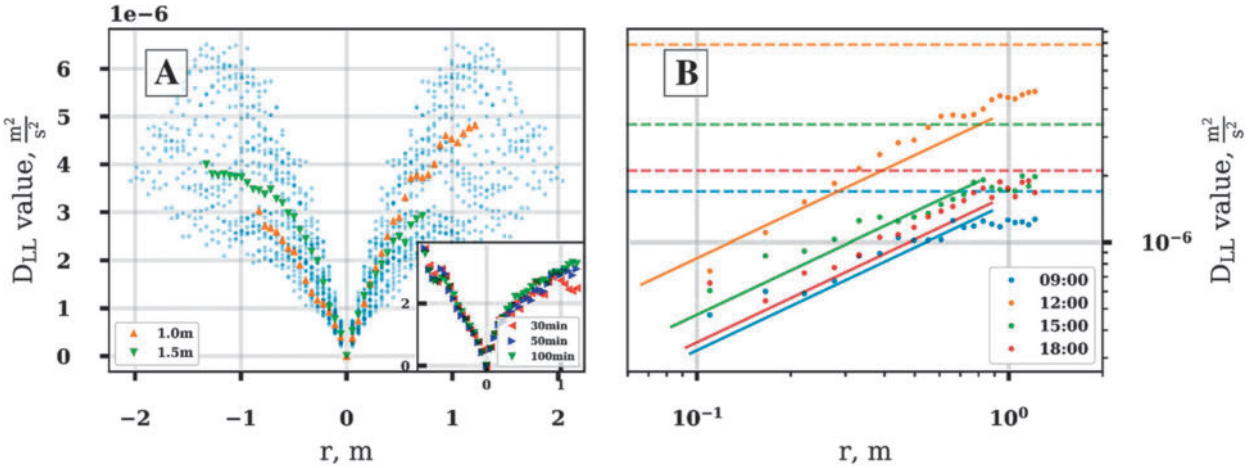



**Рис. 6.** (**A**) Усредненные по трем лучам структурные функции $D_{LL}$ для всего диапазона глубин, 11 апреля 2016 г., 12:00; интервал временно́го осреднения – 100 мин.; оранжевые и зеленые маркеры соответствуют глубинам 1 м и 1,5 м соответственно. На вставке – структурные функции, рассчитанные при разных периодах осреднения, 9 апреля 2016 г., 12:00, глубина 1,5 м; (**B**) Изменения $D_{LL}$ в течение дня 11 апреля 2016 г., глубина 1 м, отрезки прямых (линеаризованные участки соответствующих линий) представляют протяженность инерционного интервала. Оз. Вендюрское

**Fig. 6.** (**A**) Three-beam-averaged structure functions $D_{LL}$ for the full series of reference points, April 11, 2016, 12:00, 100-min averaging; the orange and green triangles represent the structure functions for reference points 1.0 and 1.5 m, respectively; inset: structure functions sequence for different averaging periods, April 9, 2016, 12:00, 1.5 m depth; (**B**) $D_{LL}$ evolution during daytime of April 11, 2016; the reference point is at 1 m depth beneath the ice cover. Thick segments show the extent of the inertial interval for each line, derived as quasi-linear parts of the corresponding curves. Lake Vendyurskoe

Скорость диссипации ε и верхняя граница $r_0$ инерционного интервала (по данным эксперимента, проведенного в апреле 2016 г. на оз. Вендюрском, глубина 1 м)

Energy dissipation rate ε and upper bound $r_0$ of the inertial interval (data from experiments on Lake Vendyurskoe, April 2016, depth 1 m)

| Time | $(\varepsilon \pm \Delta\varepsilon)\ 10^9 m^2 s^{-3}$ | $r_0/rd$ |
|---|---|---|
| Apr 09 09:00 | 1,71±0,15 | 126 |
| Apr 09 12:00 | 1,66±0,12 | 125 |
| Apr 09 15:00 | 2,10±0,33 | 133 |
| Apr 09 18:00 | 0,69±0,07 | 101 |
| Apr 10 09:00 | 1,80±0,19 | 128 |
| Apr 10 12:00 | 1,28±0,16 | 117 |
| Apr 10 15:00 | 2,10±0,14 | 133 |
| Apr 10 18:00 | 1,13±0,12 | 114 |

Характерное значение ε для обоих озер в дневное время составило ~$10^{-9}$м$^2$ с$^{-3}$, в соответствии с оценками, полученными в ряде других работ [Mironov et al., 2002; Jonas et al., 2003]. При этом величина $r_0$ в абсолютных единицах варьировалась в диапазоне (0,5–1,0) м. Для средних и максимальных значений осредненной по глубине скорости диссипации были получены значения (в единицах $10^{-9}$м$^2$ с$^{-3}$): 1,15, 3,27 в дневное время и 0,41, 1,55 в ночное (для Вендюрского озера). Что касается временно́й зависимости ε($t$), соответствующая кривая в основном отслеживает дневной цикл солнечной радиации, но во все дни наблюдается существенная (~1 часа) задержка по времени (рис. 7).

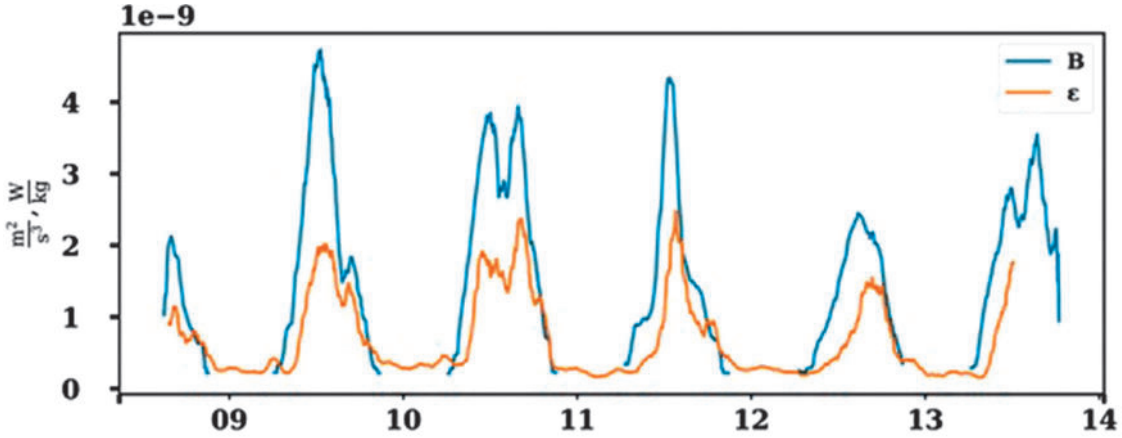



**Рис. 7.** Зависимость от времени потока плавучести $B_R$ и скорости диссипации ε за период с 9 по 13 апреля 2016 г. Оз. Вендюрское

**Fig. 7.** Buoyancy production term $B_R$ and kinetic energy dissipation rate ε dynamics, 9–13 April 2016. Lake Vendyurskoe

Следует также отметить, что несмотря на существенное затухание ε в ночное время значения этой величины превышали статистическую погрешность даже в отсутствие потока плавучести.

**4. Крупномасштабные пульсации. Турбулентные напряжения.** Ключевыми параметрами, определяющими структуру турбулентности и особенности тепломассопереноса, являются компоненты матрицы турбулентных напряжений $\langle u_i' u_j' \rangle$. При использовании велосиметров все компоненты этой матрицы могут быть рассчитаны непосредственно по опытным данным. Однако, как правило, погрешность подобных расчетов (в силу малого объема сканирования) весьма велика, и, кроме того, они выполняются лишь для одной точки, и в большинстве случаев этого недостаточно для решения конкретных задач. В этой связи уже на ранних стадиях широкого использования ADCP в практике геофизических измерений активно разрабатывались методы расчета турбулентных напряжений. Данная задача остается актуальной и в настоящее время; и возможности ADCP при изучении параметров турбулентности остаются весьма ограниченными. С учетом важности вопроса эти возможности рассмотрены более подробно для разных версий приборов.

С использованием 3-лучевого прибора для шести компонент тензора турбулентных напряжений удается получить лишь три связывающих их соотношения, при этом ни для одной из этих компонент не удается получить явного выражения. Характер этих соотношений определяется структурой трансформационной матрицы и тем фактом, что соотношения (1), связывающие лучевые скорости $b_i$ с ортогональными компонентами пульсационной скорости в соответствующей точке, линейны. Как следствие, представление (2) сохраняет силу и для соответствующих пульсационных компонент $b_i' = b_i - < b_i >$ лучевых скоростей. С учетом этого факта каждую из величин $< b_i'^2 >$ можно непосредственно выразить через компоненты тензора напряжений в соответствующей точке, например:

$$< b_1'^2 > = < u_x'^2 > \sin^2\alpha_0 + < u_z'^2 > \cos^2\alpha_0 + 2 < u_x' u_z' > \cos\alpha_0 \sin\alpha_0 . \quad (6)$$

Здесь пульсационные компоненты скорости в ортогональной системе координат обозначены величинами как $u'$ с соответствующими индексами.

В рамках допущения о локальной однородности в горизонтальной плоскости статистические характеристики пульсационных скоростей в точках, расположенных на одной глубине, одинаковы, например $< u_x'^2(A) > = < u_x'^2(B) > = < u_x'^2(C) > \equiv < u_x'^2 >$. В этом случае при использовании одного 3-лучевого прибора получаем три уравнения вида (6) для шести неизвестных. При этом, однако, ни для одного элемента матрицы напряжений получить явные выражения не удается: по результатам измерений можно определить лишь некоторые их линейные комбинации. Более того, уравнения вида (6) не позволяют рассчитать даже полную интенсивность $< u'^2 >$ турбулентности. Так, при суммировании интенсивностей «лучевых» пульсаций получаем выражение:

$$< b_1'^2 > + < b_2'^2 > + < b_3'^2 > = \frac{3}{2}(< u_x'^2 > + < u_y'^2 >)\sin^2\alpha_0 + 3 < u_z'^2 > \cos^2\alpha_0 . \quad (7)$$

В этом выражении уже нет перекрестных Рейнольдсовых компонент, и пульсации в горизонтальной плоскости и по вертикали разнесены. Тем не менее интенсивность $< u'^2 >$ турбулентности из этого выражения определить не удается, поскольку неизвестно отношение $\zeta = < u_z'^2 > / < u'^2 >$ интенсивностей вертикальных пульсаций к полной интенсивности.

Более определенные результаты удается получить при использовании 4- или 5-лучевых приборов. Здесь соотношений типа (6) – уже четыре, но выразить интенсивности пульсаций в ортогональной системе координат через квадраты пульсаций лучевых компонент также не удается. Однако в случае симметричного расположения пар лучей относительно вертикали эта задача решается для недиагональных компонент тензора, определяющих накачку энергии и перераспределение энергии между компонентами в сдвиговых течениях [Nystrom et al., 2007; Kirincich, Rosman, 2011]. В частности, для конфигурации Janus с использованием метода variance technique [Lu, Lueck, 1999; Stacey et al., 1999; Rippeth et al., 2003] эти выражения, например, для пары лучей 1 и 3, могут быть представлены в виде:

$$< u_1' u_3' > = \frac{< b_1'^2 > - < b_3'^2 >}{2\sin 2\alpha_0} .$$

Если ориентация приборов выбрана таким образом, что лучи 1 и 3 расположены в плоскости сдвига средней скорости, последнее соотношение позволяет произвести расчет энергии накачки.

Наконец с помощью 5-лучевого прибора с конфигурацией Janus+ удается получить выражения для пяти из шести турбулентных напряжений. Для осуществления полного анализа баланса турбулентной энергии, а также изучения конфигурации и топологии энергосодержащих структур в общем случае требуются, однако, все шесть компонент тензора Рейнольдса и, соответственно, трех его инвариантов.

Для полного решения проблемы необходимо увеличить число независимых уравнений типа (6) до шести. На первый взгляд кажется, что этого можно достичь, используя, например, два связанных 3-лучевых ADCP, когда общее число лучей и, соответственно, уравнений типа (6) равно 6. Оказывается, однако, что при параллельной ориентации осей приборов (например, downlooking) не все эти уравнения линейно независимы: как следует из (7), суммы интенсивностей лучевых пульсаций обоих приборов совпадают. Математически это выражается в том, что определитель матрицы коэффициентов системы, связывающей величины $< b_i'^2 >$ с турбулентными напряжениями $< u_i' u_j >$, обращается в ноль. Это обстоятельство является следствием того факта, что конфигурация

лучей обоих приборов азимутально симметрична. В итоге для отыскания шести неизвестных, как и в случае с использованием Janus+, не хватает одного уравнения. Следует отметить, что аналогичная проблема возникает и при использовании пары 4-лучевых приборов: в силу азимутальной симметрии конфигурации лучей из восьми уравнений линейно независимых – лишь пять.

Существенный прогресс в решении проблемы был достигнут в работе [Vermeulen et al., 2011], где было предложено использование специальной конфигурации двух ADCP, при которой один из приборов – Master – устанавливается с обычной – вертикальной – ориентацией оси, а ось второго – Slave – отклонена от вертикали (рис. 8, из работы [Vermeulen et al., 2011]). При такой постановке двух 3-лучевых приборов удается устранить отмеченную выше сингулярность системы уравнений. При использовании же пары 4-лучевых приборов (как это и было сделано в работе [Vermeulen et al., 2011]) система уравнений оказывается даже переопределенной.

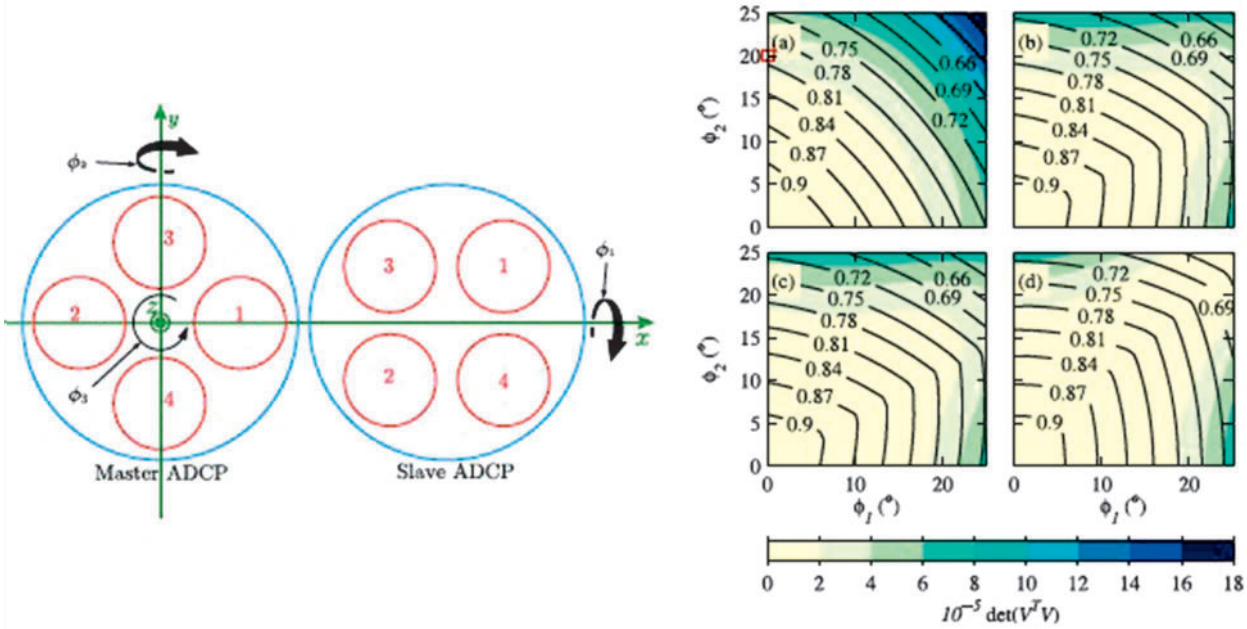



**Рис. 8.** Левая панель: система координат и углы, определяющие ориентацию оси прибора Slave (в эксперименте использовалось значение $\phi_3 = 45°$). Правая панель: зависимость детерминанта матрицы коэффициентов системы уравнений от углов поворота прибора Slave

**Fig. 8.** Left panel: definition of the Cartesian coordinate system and the angles of rotation; the Slave ADCP was rotated 45° around the z axis ($\phi_3 = 45°$). Right panel: the dependence of coefficient matrix determinant on rotation angles

Имплементация такого метода, однако, связана с рядом проблем. Во-первых, приемлемая точность достигается лишь при значительных отклонениях оси прибора Slave от вертикали. Количественным критерием такой приемлемости служит величина детерминанта матрицы коэффициентов; при этом, как видно из рис. 8, отклонение оси прибора Slave от вертикали должно составлять не менее 20°, что значительно превышает рекомендованные производителем значения (не более 5–6°). Указанные отклонения приводят также к существенному увеличению размера горизонтальной области, в которой производятся измерения и, соответственно, к более жестким требованиям по горизонтальной однородности. Кроме того, в рамках такого метода для турбулентных напряжений выводится переопределенная система уравнений, которую можно решить лишь приближенно, с использованием метода наименьших квадратов.

Альтернативный вариант решения проблемы представлен в работе [Bogdanov et al., 2021]. Его суть заключается в использовании специальной конфигурации двух жестко скрепленных 3-лучевых ADCP с вертикальной ориентацией осей приборов и наличием одной или двух точек пересечения лучей. Приборы устанавливаются на специальной удерживающей конструкции, которая жестко фиксирует их относительно льда и друг друга (см. рис. 2). Для исключения взаимного влияния сигналов двух ADCP следует использовать асинхронный режим излучателей с должным образом выбранной величиной временно́й задержки. Ориентиром при выборе такой задержки

может служить диссипативный Колмогоровский масштаб $t_d = (\eta/\varepsilon)^{1/2}$, для КПС этот масштаб составляет 10–30 с. При необходимости можно использовать различные варианты взаимного положения приборов, с одной, двумя или тремя точками пересечения лучей. В варианте Towards в некоторой точке пересекаются два луча (с номерами 1 и 4 на рис. 2), при этом глубина $h$ расположения этой точки определяется расстоянием $l$ между излучателями: $l_1/(2\ tg\ \alpha_0)$. На этой глубине измерения лучевых компонент проводились в пяти точках, при этом в точке пересечения лучей (т. $E$ на рис. 2) одновременно измеряются две лучевые компоненты скорости. Усредненные корреляции этих компонент $< b_1'b_4' >$ с помощью матрицы $A$ (см. (2)) могут быть представлены в виде линейной комбинации турбулентных напряжений:

$$< b_1'b_4' > = - < u_x'^2 > \sin^2\alpha_0 + < u_z'^2 > \cos^2\alpha_0 . \qquad (8)$$

Соотношение (8) играет роль недостающего линейно независимого уравнения. При этом полная замкнутая система уравнений для турбулентных напряжений приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} < b_1'^2 > \\ < b_2'^2 > \\ < b_3'^2 > \\ < b_4'^2 > \\ < b_5'^2 > \\ < b_1'b_4' > \end{pmatrix} = \sin^2\alpha_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2ctg\alpha_0 & 0 & 0 & ctg^2\alpha_0 \\ 1/4 & -\sqrt{3}/2 & -ctg\alpha_0 & 3/4 & \sqrt{3}ctg\alpha_0 & ctg^2\alpha_0 \\ 1/4 & \sqrt{3}/2 & -ctg\alpha_0 & 3/4 & -\sqrt{3}ctg\alpha_0 & ctg^2\alpha_0 \\ 1 & 0 & -2ctg\alpha_0 & 0 & 0 & ctg^2\alpha_0 \\ 1/4 & -\sqrt{3}/2 & ctg\alpha_0 & 3/4 & -\sqrt{3}ctg\alpha_0 & ctg^2\alpha_0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & ctg^2\alpha_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} < u_x'^2 > \\ < u_x'u_y' > \\ < u_x'u_z' > \\ < u_y'^2 > \\ < u_y'u_z' > \\ < u_z'^2 > \end{pmatrix}.$$

В случае, когда выбирается конфигурация приборов с двумя (Opposite на рис. 2) или тремя точками пересечения лучей, система уравнений оказывается даже переопределенной. При этом, следуя методике, изложенной в [Vermeulen et al., 2011], можно найти ее приближенное решение. Альтернативный вариант предполагает использование «лишних» уравнений для верификации результатов расчетов.

Пример расчета всех шести компонент матрицы турбулентных напряжений представлен на рис. 9, по результатам обработки данных, полученных на Вендюрском озере в период со 2 по 4 апреля 2020 г. и подробно представленных в работе [Богданов и др., 2021]. Интенсивности лучевых пульсаций усреднялись по промежутку времени 100 мин. Простым и наглядным индикатором адекватности

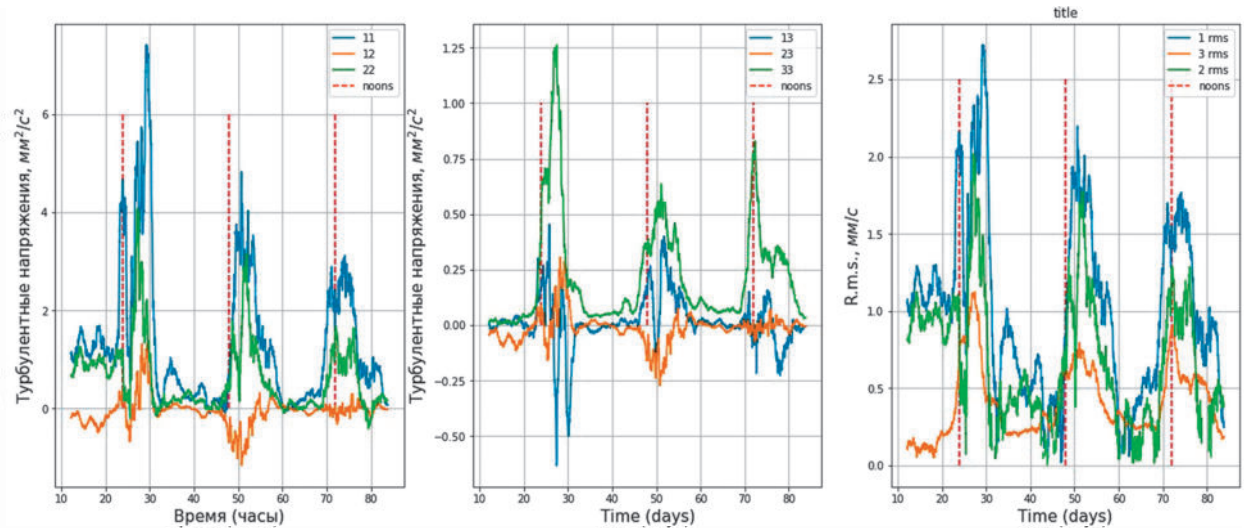



**Рис. 9.** Результаты расчета интенсивностей пульсаций различных компонент скорости (левая панель), недиагональных элементов матрицы напряжений (средняя панель) и среднеквадратичных значений пульсаций вдоль трех ортогональных осей (правая панель). Индексы соответствуют нумерации компонентов матрицы. Оз. Вендюрское, 2–4 апреля 2020 г.

**Fig. 9.** Calculated intensities of turbulent pulsations (left), off-diagonal elements of the stress matrix (middle), and RMS of pulsations along orthogonal axes (right). Labeling corresponds to the matrix indexes. Lake Vendyurskoe, April 2–4, 2020

метода могут служить выполнение так называемых условий реализуемости, в частности – положительной определенности диагональных элементов тензора (интенсивностей пульсаций вдоль ортогональных осей) и выполнение неравенств Коши-Шварца $\langle u_i u_j \rangle^2 \leq \langle u_i^2 \rangle \langle u_j^2 \rangle$ (здесь по повторяющимся индексам нет суммирования). Для указанного периода измерений доля интервалов с нарушением условий реализуемости составляла менее 4 %.

В данной работе не проводится детальный физический анализ полученных результатов, однако следует отметить несколько важных моментов. Среднеквадратичные значения (r.m.s.) пульсаций вдоль горизонтальных осей и вдоль вертикали достигали значений 2,6 мм/с и 1,1 мм/с, соответственно, а их отношение варьировалось в пределах 1,3–3,0.

Рассчитанную по потоку плавучести конвективную скорость $w^*$ можно рассматривать как прямой индикатор энергетической накачки, и в этой связи ее сравнение с r.m.s. пульсаций представляет особый интерес. Значение этого отношения, полученное при изучении различных геофизических течений, варьируется в широких пределах – от 0,1 до 0,7 [MacIntyre et al., 2018]. По приведенным выше результатам расчетов в КПС для указанного параметра получена оценка ~ 0,3, при этом отношение $w^*$ и r.m.s. значений горизонтальных пульсаций оказывается весьма близким к 1.

Что касается изменчивости турбулентных напряжений во времени, следует отметить их суточную периодичность, а также существенное (~ 1–2 часа) запаздывание по отношению к изменениям радиационного потока – эффект, аналогичный обнаруженному при изучении динамики скорости диссипации энергии. Наряду с суточной периодичностью были также обнаружены значительные вариации всех турбулентных напряжений в течение светового дня. В присутствии среднего течения подобные вариации можно рассматривать как результат сканирования крупных и неоднородных по параметрам турбулентности конвективных ячеек, движущихся мимо прибора. При этом временно́й масштаб этих вариаций позволяет произвести оценку горизонтальных размеров таких ячеек. Как показано в работе [Bogdanov et al., 2019], их размеры могут достигать десятков метров в больших озерах.

Следует также отметить, что расчет всех шести компонент матрицы напряжений позволяет произвести так называемый инвариантный анализ структуры турбулентности и топологии энергосодержащих вихрей. Его осуществляют на основе изучения тензора анизотропии

$$a_{ij} = \frac{\langle u_i u_j \rangle}{\langle u_i^2 \rangle} - \frac{1}{3}\delta_{ij},$$

а также собственных чисел и векторов тензора напряжений. При этом особенно наглядно результаты могут быть представлены с использованием второго (II) и третьего (III) инвариантов этого тензора. Физический домен их возможных значений ограничен пределами 2-мерной и осесимметричной турбулентности (линии AB и OA, OB на рис. 10). Положение изображающей точки системы внутри такого домена (AIM, Anisotropy Invariant Map) позволяет непосредственно установить характер анизотропии. На рис. 10 для примера представлена совокупность таких изображающих точек для одного из периодов измерений на Вендюрском озере. Семейство этих точек обнаруживает достаточно удивительное свойство: они группируются в нескольких компактных областях – «аттракторах», соответственно, на левой и правой ветвях физического домена, при этом приближаются вплотную к его границам.

Такое поведение обусловлено специфической динамикой колебаний значений собственных чисел матрицы напряжений и свидетельствует о чередовании превалирующих типов анизотропии турбулентных структур (условно – prolate / oblate spheroid, или rod-like и disk-like). При этом корреляция этих колебаний с тепловым потоком практически отсутствует. Подобный эффект был также отмечен при численном моделировании конвекции в температурно-стратифицированной среде [Smyth, Moum, 2000].

Особого внимания заслуживает также вопрос об оценке погрешностей. В условиях, когда уровень шума исходного сигнала достаточно велик, целесообразно использовать двухступенчатое усреднение, при этом на первом шаге производится усреднение сигналов от отдельных импульсов (pings) внутри пакета (burst). Например, при измерениях на Вендюрском озере весной 2020 г. предварительное усреднение производилось по 16-секундному промежутку, включавшему 32 импульса с частотой 2 Гц. Эффективность такой процедуры уменьшения (примерно в $\sqrt{n_1}$ раз) инструментального шума отмечалась в работе [Williams, Simpson, 2004].

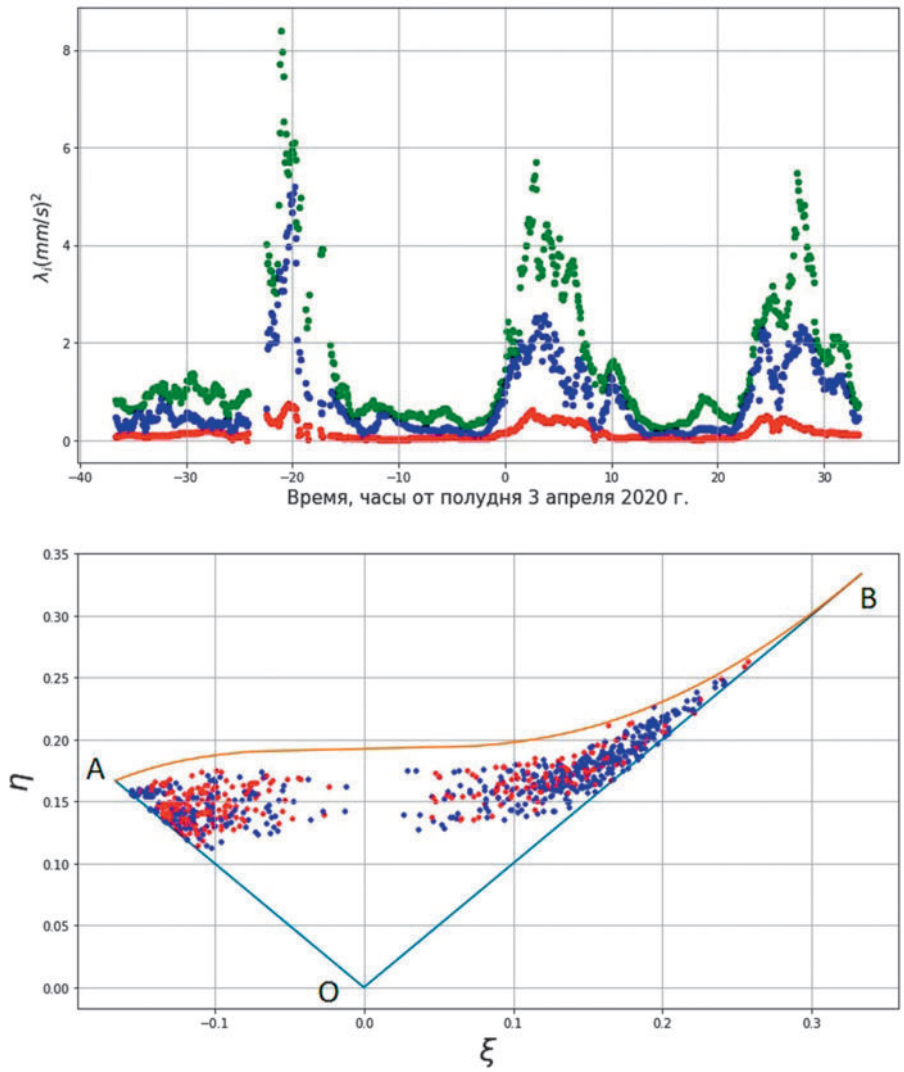



**Рис. 10.** Динамика трех собственных чисел матрицы турбулентных напряжений (верхняя панель) и семейство изображающих точек на плоскости инвариантов $\xi = (III/2)^{1/3}$ и $\eta = (II/3)^{1/2}$. Оз. Вендюрское, 3–5 апреля 2020 г.

**Fig. 10.** The calculated dependence of three stress matrix eighenvalues on time (top panel). The set of invariants $\xi = (III/2)^{1/3}$ and $\eta = (II/3)^{1/2}$ computed at discrete times for the interval from 3rd to 5th of April 2020. Lake Vendyurskoe

На второй стадии, следуя методике, представленной в работах [Stacey et al., 1999; Williams, Simpson, 2004], осуществлялось собственно ансамблевое осреднение по промежуткам времени 50–100 мин. (т. е. с использованием $n_2$ = 50–100 «мгновенных» значений скорости, полученных по результатам предварительного осреднения). При этом расчет погрешностей $\sigma_{R,\,i}$ для напряжений осуществлялся в рамках стандартных допущений: не учитываются корреляции сигналов на разных лучах, распределение каждого из них считается Гауссовым, на временном интервале осреднения процесс считается квазистационарным.

Для разных компонент тензора Рейнольдса оценки погрешностей существенно отличаются, что ожидаемо, с учетом высокой чувствительности расчетов по отношению к угловой разнесенности лучей. В частности, погрешность определения максимальных значений варьируется от 10 % (для $<u_1'^2>$ и $<u_3'^2>$) до 30–40 %. Наиболее проблемной является компонента $<u_2'^2>$. При этом даже для этой компоненты пороговые детектируемые значения оказались достаточно низкими – (0,3–1,4) мПа.

**Заключение.** В настоящее время акустические профилографы представляют собой один из основных инструментов экспериментального изучения гидродинамики водных объектов. Их широкому распространению в практике океанологических и лимнологических исследований способствуют простота и компактность конструкции, а также достаточно высокая точность измерений. Определенные ограничения, связанные с высокой чувствительностью к выполнению условия горизонтальной однородности, а также с выбором глубины и дискретности вертикального сканирования, во многих случаях удается преодолеть, используя гибкость выбора рабочих режимов и параметров прибора.

Что касается методов обработки данных, то в наибольшей степени они разработаны и апробированы для решения задач, связанных с профилированием средней скорости и расчетом параметров мелкомасштабной турбулентности. В то же время вопрос о возможностях использования ADCP для оценок турбулентных напряжений во многом остается открытым, в этой связи именно данному вопросу была посвящена значительная часть данной работы. При этом показано, в частности, что значительный прогресс в решении проблемы достигается при использовании двух приборов, закрепляемых в специальной конфигурации.

Эффективность соответствующего метода доказывают результаты, полученные при обработке данных специальных натурных экспериментов, включавших измерения температуры воды, скоростей течений и подледной радиации в конвективно-перемешанном слое покрытых льдом бореальных озер. Несмотря на относительную слабость сигнала скоростей, получены физически состоятельные (в смысле выполнения условий реализуемости) результаты по изменению во времени интенсивностей пульсаций и недиагональных компонент тензора Рейнольдса.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какой параметр определяет максимальную глубину сканирования при использовании ADCP?
2. Почему измерения скорости с помощью ADCP возможны лишь при выполнении условия горизонтальной однородности течения?
3. Какие принципы лежат в основе измерения скорости с помощью ADCP? Чем отличаются режимы "normal" и "pulse-coherent"?
4. Чем отличается велосиметр от профилографа?
5. Что представляют собой «лучевые скорости»?
6. В стандартных версиях ADCP угол $\alpha_0$ отклонения лучей от вертикали составляет 20º или 25º. Целесообразно ли использовать бóльшие/меньшие значения для этого угла?
7. Как можно охарактеризовать диссипативный и инерционный интервалы масштабов при изучении турбулентности?

## Задания

По экспериментальным данным, полученным в период весенней подледной конвекции, выполнить анализ структуры конвективно-перемешанного слоя (КПС) и произвести расчеты его основных параметров.

1. По данным термокосы оценить среднюю температуру и толщину $h_C$ КПС; построить зависимость этих параметров от времени.
2. Используя измерения потока радиации в толще воды подо льдом, рассчитать поток плавучести и конвективную скорость $w^*$.
3. По рассчитанным значениям $h_C$ и $w^*$ оценить характерные временные и пространственные масштабы энергосодержащих пульсаций.
4. Определив период осреднения, с использованием трансформационной матрицы произвести расчет средней скорости.
5. По формуле (5) рассчитать среднюю скорость диссипации энергии, проанализировать суточную динамику этого параметра, произвести сравнение с динамикой потока плавучести.
6. Рассчитать интенсивности пульсаций лучевых компонент скорости. С использованием трансформационной матрицы (см. в тексте: Крупномасштабные пульсации. Турбулентные напряжения) вычислить компоненты тензора напряжений.

## Литература

*Волков С. Ю., Богданов С. Р., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю.* Крупномасштабная структура конвективного перемешанного слоя в мелководном озере подо льдом // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 30–39. doi: 10.7868/S2073667319010040.

*Austin J. A.* Observations of radiatively driven convection in a deep lake // Limnol. Oceanogr. 2019. 64: 2152–2160. doi: 10.1002/lno.11175.

*Bogdanov S. et al.* Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland Waters. 2019. 9(2): 177–192.

*Bogdanov S. R., Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Yu., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Kuldin N. A., Kirillin G. B.* Deriving of Turbulent Stresses in a Convectively Mixed Layer in a Shallow Lake Under Ice by Coupling Two ADCPs // Fundamentalnaya I Prikladnaya Gidrofizika. 2021. 14. 2. 17–28. doi: 10.7868/S2073667321020027.

*Chandrasekhar S.* The theory of axisymmetric turbulence // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1950. 242(855): 557–577. http://doi.org/10.1098/rsta.1950.0010.

*Deardorff J. W.* Preliminary results from numerical integrations of the unstable planetary boundary layer // Atmos. Sci. 1970. 27: 1209–1211.

*Guerra M., Thomson J.* Turbulence Measurements from Five-Beam Acoustic Doppler Current Profilers // Atmos. Ocean. Technol. 2017. 34(6): 1267–1284.

*Howarth M. J.*, *Souza A. J.* Reynolds stress observations in continental shelf seas. Deep Sea Res II. 2005. 52(9–10): 1075–1086.

*Jabbari A., Boegman L., Piomelli U.* Evaluation of the inertial dissipation method within boundary layers using numerical simulations // Geophys. Res. Lett. 2015. 42: 1504–1511. doi: 10.1002/2015GL063147.

*Jabbari A., Rouhi A., Boegman L.* Evaluation of the structure function method to compute turbulent dissipation within boundary layers using numerical simulations // Geophys. Res. Ocean. 2016. 121: 5888–5897. doi: 10.1002/2015JC011608.

*Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A.* Radiatively driven convection in an ice-covered lake investigated by using temperature microstructure technique // Geophys. Res. 2003. 108(C6). 3183. doi: 10.1029/2002JC001316, 2003.

*Kirillin G. et al.* Turbulence in the stratified boundary layer under ice: observations from Lake Baikal and a new similarity model // Hydrology & Earth System Sciences. 2020. 24(4): 1691–1708.

*Kirincich A. R., Rosman J. H.* A Comparison of Methods for Estimating Reynolds Stress from ADCP Measurements in Wavy Environments // Atmos. Ocean. Technol. 2011. 28: 1539–1553. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00001.1

*Lhermitte R.* Turbulent air motion as observed by Doppler radar. Paper presented at 13th Radar Meteorological Conference, Am. Meteorol. Soc. 1968, Montreal, Que., Canada.

*Lhermitte R.* Doppler sonar observation of tidal flow // Geophys. Res. 1983. 88: 725–742.

*Lohrmann A., Hackett B., Roed L.* High-resolution measurements of turbulence, velocity, and stress using a pulse-to-pulse coherent sonar // Atmos. Ocean. Technol. 1990. 7: 19–37.

*Lorke A., Wüest A.* Application of Coherent ADCP for Turbulence Measurements in the Bottom Boundary Layer // Atmos. Ocean. Technol. 2005. 22: 1821–1828.

*Lu Y., Lueck R. G.* Using a broadband ADCP in a tidal channel. Part II: Turbulence // Atmos. Ocean. Technol. 1999. 16: 1568–1579.

*Lucas N. S., Simpson J. H., Rippeth T. P., Old C. P.* Measuring Turbulent Dissipation Using a Tethered ADCP // Atmos. Ocean. Technol. 2014. 31: 1826–1837. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00198.1.

*MacIntyre S. et al.* Turbulence in a small Arctic pond // Limnol. Oceanogr. 2018. 63(6): 2337–2358. doi: 10.1002/lno.10941.

*Mironov D. et al.* Radiatively driven convection in ice-covered lakes: Observations, scaling, and a mixed layer model // Geophys. Res. 2002. 107(C4). doi:10.1029/2001JC000892.

*Mohrholz V., Prandke H., Lass H. U.* Estimation of TKE dissipation rates in dense bottom plumes using a Pulse Coherent Acoustic Doppler Profiler (PC-ADP) – Structure function approach // Marine Systems. 2008. Vol. 70. Issue 3. P. 217–239.

*Monin A. S., Yaglom A. M.* Statistical Fluid Mechanics. Vol. II: Mechanics of Turbulence. 2013. 896 p. Dover Books on Physics. Courier Corporation.

*Nystrom E. A., Rehmann C. R., Oberg K. A.* Evaluation of mean velocity and turbulence measurements with ADCPs // Hydraul. Eng. 2007. 133(12): 1310–1318.

*Rippeth T. P., Simpson J. H., Williams E., Inall M. E.* Measurement of the rates of production and dissipation of turbulent kinetic energy in an energetic tidal flow: Red Wharf Bay revisited // Phys. Oceanogr. 2003. 33(9): 1889–1901.

*Smyth W. D., Moum J. N.* Anisotropy of turbulence in stably stratified mixing layers // Physics of Fluids. 2000. 12(6): 1343–1362. https://doi.org/10.1063/1.870386.

*Stacey M. T., Monismith S. G., Burau J. R.* Measurements of Reynolds stress profiles in unstratified tidal flow // Geophys. Res. 1999. 104(C5): 10933–10949. doi: 10.1029/1998JC900095.

*Vermeulen B., Hoitink A. J. F., Sassi M. G.* Coupled ADCPs can yield complete Reynolds stress tensor profiles in geophysical surface flows // Geophys. Res. Lett. 2011. 38. L06406. doi: 10.1029/2011GL046684.

*Volkov S. et al.* Fine scale structure of convective mixed layer in ice-covered lake // Envir. Fluid Mech. 2019. 19: 751–764. https://doi.org/10.1007/s10652-018-9652-2.

*Wiles P. J. et al.* A novel technique for measuring the rate of turbulent dissipation in the marine environment // Geophys. Res. Lett. 2006. 33. L21608. doi:10.1029/2006GL027050.

*Williams E., Simpson J. H.* Uncertainties in Estimates of Reynolds Stress and TKE Production Rate Using the ADCP Variance Method // Atmos. Ocean. Technol. 2004. 21: 347–357. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0347:UIEORS>2.0.CO;2.

*Zdorovennov R. et al.* Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // Est. J. Earth Sci. 2013. 61(1): 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Богданов Сергей Рэмович**
ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., доцент
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

**Здоровеннов Роман Эдуардович**
старший научный сотрудник, к.г.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com

**Пальшин Николай Иннокентьевич**
старший научный сотрудник, к.г.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: npalshin@mail.ru

**Здоровеннова Галина Эдуардовна**
руководитель лаб. гидрофизики,
старший научный сотрудник, к.г.н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

**Bogdanov, Sergey**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

**Zdorovennov, Roman**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com

**Palshin, Nikolai**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru

**Zdorovennova, Galina**
Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
50, Al. Nevsky Ave., 185030, Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com

# ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
# HISTORY OF RESEARCH












УДК 061.62:556.01(09)(282.247.181.1)

# ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА (ИППЭС) НА ОЗЕРЕ ИМАНДРА

**С. С. Сандимиров**

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,*
*ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия*

**Аннотация.** Краткая история ранних исследований Кольского полуострова и современное изучение формирования качества вод озера Имандра в условиях антропогенных нагрузок.

**Ключевые слова:** Кольский полуостров; озеро Имандра; Институт проблем промышленной экологии Севера; Лаборатория водных экосистем.

## HISTORY OF LAKE IMANDRA RESEARCH BY THE INSTITUTE OF NORTH INDUSTRIAL ECOLOGY PROBLEMS (INEP)

**S. S. Sandimirov**

*Institute of North Industrial Ecology Problems,*
*Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*

**Summary.** The lecture narrates a brief history of early studies in the Kola Peninsula and current research on water quality formation in Lake Imandra under human pressure.

**Keywords:** Kola Peninsula; Lake Imandra; Institute of North Industrial Ecology Problems; Laboratory of Aquatic Ecosystems.

**Тема лекции.** «История исследований Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) на озере Имандра».

**Цель.** Актуализация знаний об истории исследований озера Имандра (Кольский полуостров).

**Задачи.** Образовательная задача: углубление представления о водах суши и их роли в природе. Познавательная задача: формирование интереса к исследовательской деятельности. Предметная задача: усвоение гидрографических понятий, умение правильно показывать и называть объекты на географической карте, определять экологические угрозы и риски.

**План изложения материала.**

Введение. Из истории исследований оз. Имандра.

1. Общая характеристика оз. Имандра.
2. Антропогенная нагрузка на оз. Имандра.
3. Лаборатория водных экосистем ИППЭС: современные исследования.

Заключение.

**Демонстрационные и наглядные пособия, презентация.** В презентации показаны старинные и современные карты озера Имандра, приведена краткая характеристика, представлены все виды бывшей и современной антропогенной нагрузки на водоем, дана краткая история научных исследований.

## Изложение материала

**Введение. Из истории исследований оз. Имандра.** История исследований водоемов Кольского Севера включает несколько этапов, отличающихся и широтой, и методическими подходами. На первом этапе, особенно в XIX столетии, исследования ограничивались лишь описанием

наиболее доступных водоемов Русской Лапландии, местоположение озер чаще всего указывалось приблизительно. Сбор материала путешественниками-натуралистами проводился лишь во время кратковременных остановок. Однако и эти данные позволили узнать естественное состояние озер и рек в далеком прошлом.

Самым ранним свидетельством об озере Имандра является его изображение на географической карте Олая Магнуса, составленной в 1539 г. [Кордт, 1906: цит. по Рихтер, 1934]. Вначале все выглядело не совсем понятно, но со временем озеро приобрело свои настоящие очертания (рис. 1).



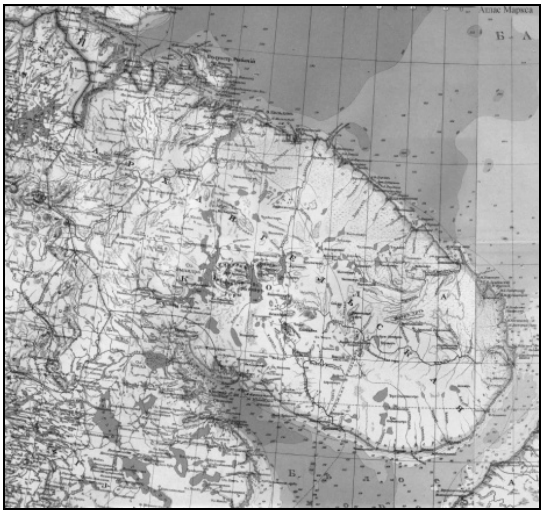

Olaus Magnus (1539)




Sebastian Munster (1554)




Anthony Finnley (1831)



Изд-во А. С. Маркса (1905)

**Рис. 1.** Изображение оз. Имандра на старых картах

**Fig. 1.** Lake Imandra as depicted in old maps

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 озера. «Чудную картину представляет это озеро, как в ясную, так и в бурную погоду. Сжатое в узкой долине громадными, высокими горами, покрытыми до известной высоты сперва лиственным, а затем крупным сосновым лесом, при скалистых берегах, громадном количестве островов, совершенно чистой, прозрачной воде, оно вполне имеет характер горного озера» [Кудрявцев, 1882].

В начале 1920 г. А. Е. Ферсман вместе с А. П. Карпинским и А. П. Герасимовым совершил поездку 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. Им и его сотрудниками также были обнаружены железорудные месторождения на берегах оз. Имандра. Все эти открытия надолго определили судьбу края – см. в работе [Отечественные физико-географы и путешественники, 1959].

С середины 1920-х гг. начинается новый этап исследований на Кольском Севере, когда целенаправленно организовывались экспедиции центральных научных учреждений страны для изучения ресурсного потенциала внутренних вод, связанные с промышленным освоением региона и стремлением получить достоверные данные о рыбохозяйственных возможностях водоемов. Исследования водоемов уже отличаются комплексностью: наряду с гидробиологическими работами одновременно проводились гидрологические и гидрохимические исследования. Описывались также водосборные бассейны озер.

В 1924 г. первое научное учреждение на Русском Севере – Мурманская биологическая станция (рис. 2) – начала комплексные лимнологические исследования крупных озер Кольского Севера [Яковлев, Кашулин, 2012]. Сотрудники биологической станции внесли существенный вклад в развитие географических и ботанических исследований оз. Имандра.



**Рис. 2.** Мурманская биологическая станция в г. Александровске, 1924 г. (ныне г. Полярный)

**Fig. 2.** Murmansk Biological Research Station in Alexandrovsk, 1924 (now Polyarny)

В 1925 г. выполнены морфологические и батиметрические работы, гидрологические исследования, гидробиологические и ихтиологические работы. Сотрудником Имандровской экспедиции Гавриилом Дмитриевичем Рихтером в 1926 г. и 1928 г. была составлена карта оз. Имандра с указанием глубин (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». С тех пор батиметрией озера никто специально не занимался. Сотрудниками ИППЭС со временем обновлялись отдельные участки на карте в тех местах, где приходилось работать или где различия были слишком значительными.

В 1930 г. на оз. Имандра начали работу экспедиции Колонизационного отдела Мурманской железной дороги и Ленинградского ихтиологического института. На следующий год работы продолжила Кольская комплексная экспедиция АН СССР и Государственного гидрогеологического института. В 1933 г. на озере работала экспедиция Геоморфологического института. В 1940 г. Кольской базой АН СССР подготовлен сборник «Материалы к изучению вод Кольского полуострова» (под ред. Г. Ю. Верещагина). Несколько работ содержат сведения о гидрохимии вод, систематике рыб, составе зоопланктона и зообентоса оз. Имандра.

После Великой Отечественной войны лимнологические работы на Кольском Севере возобновлены Отделом гидрологии и гидроэнергетики Кольского филиала АН СССР.

Дальнейшее изучение водоемов Кольского полуострова в 1959–1963 гг. связано с рыбохозяйственными исследованиями экспедиций Государственного научно-исследовательского института озерного и речного хозяйства (ГосНИОРХ) и Полярного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО). Результаты работ представлены в книге «Рыбы Мурманской области» [1966].

Комплексная экспедиция Института озероведения АН СССР провела в 1967–1970-х гг. обследование ряда озер Кольского полуострова, расположенных в различных ландшафтных условиях, в том числе оз. Имандра. Результаты исследований изложены в двухтомном сборнике «Озера различных ландшафтов Кольского полуострова» [1974] и в монографии «Большие озера Кольского полуострова» [1976]. Наряду с подробной физико-географической и климатической характеристикой водосборных бассейнов озер приводятся гидрологические, термические, радиационные, гидрохимические и биологические данные.

С 1973 по 1990-е гг. на оз. Имандра работала лаборатория Мурманского территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (МУГМС). Гидрологические и гидрохимические исследования проводились на научно-исследовательском судне «Гидролог».

## 1. Общая характеристика оз. Имандра

***Морфометрия.*** Озеро Имандра расположено в глубокой депрессии, которая простирается с севера на юг Кольского полуострова от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря. В ее пределах расположены большие болотные массивы и многочисленные крупные и мелкие озера. Имандра – не только самый крупный водоем Кольского полуострова и Заполярья, но и одно из крупнейших озер в Европе (19-е место). Длина озера 109 км, средняя ширина – 3,19 км, площадь с островами – 880,4 км$^2$, объем воды – 10,86 км$^3$. Общая площадь водосбора составляет 12 300 км$^2$ (табл. 1). Абсолютная высота горизонта вод Имандровского водохранилища – 127,83 м над уровнем моря (по данным нивелировки Гидроэлектропроекта). Глубины 15–20 м составляют почти 25 % площади озера. Меньшие глубины занимают до 70 % площади, и совсем немного приходится на большие глубины.

**Таблица 1.** Морфометрическая характеристика оз. Имандра [Рихтер, 1926]

**Table 1.** Morphometric characteristic of Lake Imandra [Richter, 1926]

| Параметр | Большая Имандра | Йокостровская Имандра | Бабинская Имандра | Озеро в целом |
|---|---|---|---|---|
| Длина по оси, км | 54,7 | 44,6 | 21,4 | 109,0 |
| Длина береговой линии, км | 285,8 | 266,6 | 204,6 | 757 |
| Общая площадь, км² | 327,5 | 361,9 | 191,0 | 880,4 |
| Площадь зеркала, км² | 311,6 | 352,2 | 148,7 | 812,5 |
| Количество островов | 80 | 42 | 22 | 144 |
| Наибольшая глубина, м | 67,0 | 42,0 | 43,5 | 67,0 |
| Средняя глубина, м | 14,7 | 10,9 | 16,3 | 13,3 |
| Объем воды, км³ | 4,58 | 3,85 | 2,43 | 10,86 |
| Площадь водосбора, км² | 499,5 | 6070 | 1237,5 | 12 300 |

***Гидрография.*** Гидрографическая сеть представлена 1379 водотоками общей длиной 4761 км и 2495 озерами с общей площадью зеркала 1575,32 км$^2$. Большинство водотоков (1300) – малые ручьи, имеющие протяженность менее 10 км [Ресурсы…, 1970]. Все реки и ручьи по своему характеру разделены на два типа – горные и озерно-болотные. Горные реки встречаются в основном по восточному берегу Большой Имандры, где расположен горный массив Хибинских тундр. Озерно-болотный тип рек начинается с гор Чуна- и Монче-тундр, и, протекая по низменностям, образует сложную цепь озер, чередующихся с бурными и порожистыми участками.

***Гидрологический режим.*** *Температура.* Имандра относится к типу умеренно-холодных водоемов. После освобождения озера ото льда масса воды начинает быстро нагреваться, и устанавливается прямая температурная стратификации (рис. 3). Переход температуры через 10 °С отмечается обычно в третьей декаде июля. Наиболее прогревается слой воды 0–10 м – до 14 °С, а в отдельные годы до 18 °С.

В августе начинается понижение температуры поверхностных слоев, и к сентябрю температура воды, как правило, снижается до 8 ºС. В конце октября наблюдается выравнивание температур до 4 °С, и к середине ноября льдом обычно покрывается всё озеро, в отдельные годы – в начале декабря. Подо льдом температура меняется в пределах от 0 °С в поверхностном слое, до 2,6 °С – в придонном.

*Уровень озера.* С преобразованием оз. Имандра в водохранилище [1952] уровенный режим резко изменился, что привело к существенным колебаниям уровня воды в зависимости от работы каскада Нивских ГЭС. Зимой 1958/59 гг. уровень оз. Имандра был понижен на 3,7 м, в следующую

зиму – еще на 1,5 м, и весной 1960 г. уровень озера оказался на 30 см ниже горизонта «мертвого объема». С 1974 г. в связи с началом работы Кольской АЭС сработка уровня воды, как правило, не превышает 1,5 м, составляя в среднем 1,27 м (рис. 4).

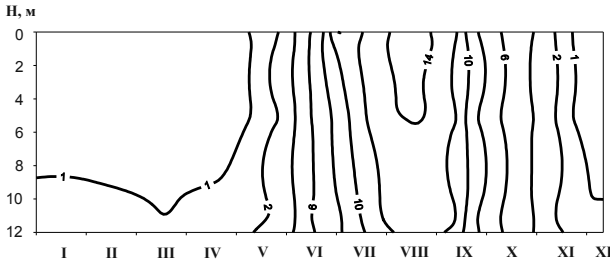



**Рис. 3.** Сезонный ход температуры в плесе Йокостровская Имандра

**Fig. 3.** Seasonal temperature variations in Yokostrovskaya Imandra area

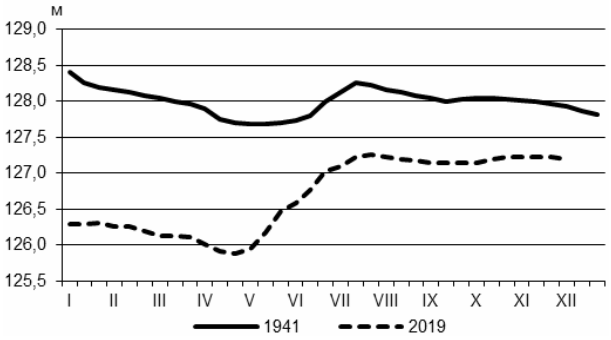



**Рис. 4.** График колебаний уровня воды оз. Имандра (плес Йокостровская Имандра)

**Fig. 4.** Graph of water level fluctuations in Lake Imandra (Yokostrovskaya Imandra area)

Годовые колебания уровня воды также зависят от метеорологических условий: количества и распределения осадков, величины испарения, интенсивности таяния снега в зависимости от хода температур воздуха. В связи с зарегулированием стока низкие уровни воды наблюдаются в любом месяце года, за исключением января – февраля. Низшие зимние уровни, как правило, наблюдаются в апреле – мае – в период предвесенней сработки уровня. Низшие летние уровни воды могут быть в любой день безледоставного периода.

*Течения.* Течения в озере можно подразделить на два типа – постоянные, связанные с уклоном уровня озера к стоку и влиянием притоков, и временные, вызванные ветрами. Существуют еще конвекционные течения, вызванные отличиями температур различных участков и глубинных слоев. Скорости этих течений невелики, но имеют важное значение в циркуляции вод озера. Скорости течений колеблются в значительных пределах, наибольшая – 17 см/с. У подветренного берега скорости поверхностного течения несколько меньше, чем в середине и у наветренного берега. В Йокостровской Имандре при ветре 4 м/с они составляют 8 см/с, а в Бабинской Имандре – 5 см/с.

Специальных наблюдений над волнами оз. Имандра не проводилось, но, по нашим наблюдениям, высота волны в ветреную погоду может достигать высоты до 1 м, а в штормовую до 1,5 м.

**2. Антропогенная нагрузка на оз. Имандра.** Летом 1907 г. в западную часть Кольского полуострова приехал Михаил Михайлович Пришвин. «Имандра, – записал путешественник, – это мать, молодая, спокойная. Быть может, и я когда-нибудь здесь родился, у этого пустынного спокойного озера, окруженного чуть видными черными горами с белыми пятнами. Я знаю, что озеро высоко над землей, что тут теперь солнце не сходит с неба, что всё здесь прозрачно и чисто, и всё это потому, что очень высоко над землей, почти на небе». В те времена это был непотревоженный уголок планеты, еще неведомый и прекрасный в своей первозданности.

Антропогенная нагрузка на поверхностные воды Кольского полуострова, представляющая практически все виды воздействий (транспорт; горнодобывающая и химическая промышленности; цветная и черная металлургия; энергетика; муниципальное, рыбное и сельское хозяйство), началась более 100 лет назад, со строительства Мурманской железной дороги в 1915 г. (рис. 5).

Используя береговую линию оз. Имандра (124 км), строительство вели сразу из нескольких пунктов. Всего было задействовано около 20 000 человек (в начале строительства 6550 чел.). В Кандалакше на баржи грузили паровозы, платформы, рельсы, инструмент, а потом буксирный пароход тянул весь груз в северный конец озера.

Особенностью промышленного освоения Кольского Севера является его нацеленность на добычу и переработку минерального и топливного сырья. Как правило, наибольшее загрязнение водных объектов связано с функционированием предприятий по добыче и переработке полезных ископаемых и транспортно-энергетических объектов, где обозначились импактные зоны загрязнения.

На водосборе оз. Имандра основными являются: Оленегорск, Мончегорск, Апатиты, Африканда, Ковдор (рис. 6). В настоящее время в Кольскую энергосистему на Имандре входят каскад Нивских гидроэлектростанций и Кольская АЭС. Каждая ГЭС имеет водохранилище, обеспечивающее многолетнее регулирование стока.



**Рис. 5.** Американская землеройная машина (применялась при строительстве железной дроги в 1915–1916 гг.)

**Fig. 5.** North American excavating machine (used in railway construction in 1915–1916)

Функционирование промышленных комплексов привело к загрязнению поверхностных вод взвешенными веществами, минеральными солями, тяжелыми металлами, токсичными органическими веществами – флотореагентами, нефтепродуктами. Аэротехногенным путем территория водосбора озера загрязнялась соединениями серы и тяжелыми металлами. Поступление загрязнения с водосборной поверхности оценить количественно крайне затруднительно, однако, по расчетам ТОО «Инвэко-проект», доля массы загрязняющих веществ, поступивших в водные объекты с водосборной поверхности, составляет до 20 % (бассейн р. Нива) от суммарного сброса.

Развитие производства неизбежно сопровождалось строительством городов, поселков и формированием сточных вод коммунального происхождения. Внесение в водоемы биогенных и органических веществ постепенно приводило к их эвтрофированию.

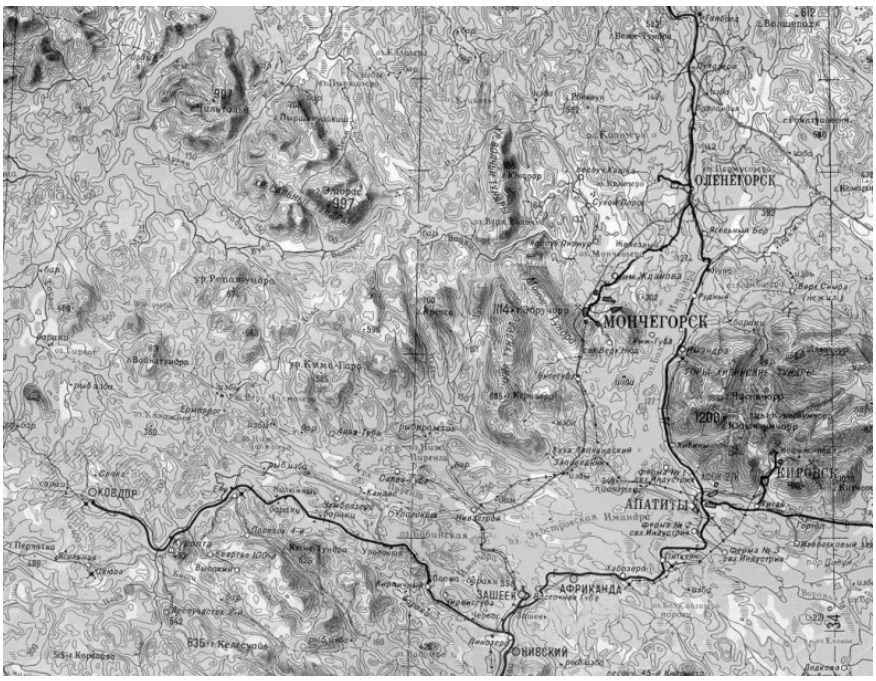



**Рис. 6.** Схема использования территории водосбора оз. Имандра

**Fig. 6.** Human activities in Lake Imandra catchment area

***Горнодобывающая промышленность.*** АО «Апатит» – крупнейший в России и Европе производитель фосфатного сырья для изготовления минеральных удобрений. Предприятие осуществляет разработку хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд, производит их добычу и обогащение. Основная продукция – апатитовый и нефелиновый концентраты.

В 1929 г. был введен в строй Апатитовый рудник, а в 1931 г. – первая обогатительная фабрика (АНОФ-I). Именно с этого времени в восточную часть оз. Имандра по р. Белой начали поступать без очистки сточные воды. Впоследствии на р. Белой была построена серия отстойников. В 1964 г. была построена 2-я обогатительная фабрика (АНОФ-II). Одновременно со строительством АНОФ-II был сооружен отстойник-накопитель (3,4 км$^2$) в губе Белой оз. Имандра, современная площадь которого с хвостохранилищем – более 16 км$^2$. Ежедневно для производственных целей фабрика забирала 400 тыс. м$^3$ чистой воды. Рядом с АНОФ-III (введена в эксплуатацию в 1984 г.) на р. Жемчужной сооружено хвостохранилище, современная площадь с отстойниками – около 14,9 км$^2$. За все годы предприятием добыто и переработано более 2 млрд т руды, выпущено более 700 млн т апатитового и свыше 72 млн т нефелинового концентратов.

Загрязнение озера достигло максимума в конце 1970-х гг. («пора расцвета» предприятия) – ежегодно сбрасывалось 240 млн м$^3$ отходов. В составе сточных вод в водоем вносились тысячи тонн взвешенных веществ, сульфатов, хлоридов, тонны фосфора, нефтепродуктов и других загрязняющих веществ, также в их составе присутствовали остаточные концентрации токсичных органических веществ, применяемых в процессе флотации апатит-нефелиновых руд (ОП-4, талловые масла и др.). Прозрачность вод в губе Белой в этот период составляла всего 0,5–1,0 м. 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 142–183 млн м$^3$/год. Прозрачность воды увеличилась до 2 м. Предприятие планомерно проводит модернизацию производственных мощностей с использованием инновационных экологически безопасных и ресурсосберегающих технологий.

Африкандское месторождение перовскит-титаномагнетитовых руд расположено на южном берегу оз. Имандра, в 1,5 км от ж/д станции Африканда. Отработка участка месторождения велась открытым способом. Конечными продуктами обогатительной фабрики (пущена в строй в 1957 г.) являлись перовскитовый и титаномагнетитовый концентраты. Некоторое время Африкандское рудоуправление перерабатывало привозные медно-никелевые руды, но в начале 1980-х гг. фабрика была остановлена. Отходами добычи и обогащения являлись хвосты обогащения (18,7 млн т за период эксплуатации карьера) и радиоактивные отходы (4290 т за период эксплуатации карьера).

Месторождение Куру-Ваара (гранитные пегматиты) расположено в юго-западной части водосбора оз. Имандра, на территории Ковдорского района. Полезное ископаемое – полевошпатовое сырье. На месторождении (с 1965 г. – рудник «Чалмозеро») расположены производственные сооружения ОАО «Чалмозеро» (с 2004 г. – ООО «Ковдорслюда», с 2006 г. – ООО «Кольский пегматит») – котельная, электроподстанция, цех крупного дробления и ручной рудосортировки, административно-бытовой комбинат. В 1969–1983 гг. была проведена доразведка месторождения с целью прироста промышленных запасов полевошпатового сырья в количестве, необходимом для обеспечения Чупинской пегматит-обогатительной фабрики. Разработка Центрального и Северного участков месторождения велась открытым способом транспортной системой разработки с внешним отвалообразованием. Отходами добычи и обогащения являются отвалы вскрышных пород общим объемом около 7 млн м$^3$.

Месторождение бадделеит-апатит-магнетитовых руд расположено в юго-западной части водосбора оз. Имандра в г. Ковдоре. С 1958 г. началось активное строительство инфраструктуры «Ковдорский ГОК». Месторождение разрабатывается открытым способом. Официальное открытие состоялось 5 сентября 1962 г. С 1975 г. комбинат помимо магнетитового стал выпускать апатитовый и бадделеитовый концентраты. Объем выпуска основной продукции: железная руда – 5,7 млн т/год; апатит – 2,7 млн т/год; бадделеит – 8,85 тыс. т/год. Современная площадь хвостохранилища с отстойниками – около 8,85 км$^2$.

Ранее на территории Ковдорского района предприятием «Ковдорслюда» (основано в 1967 г., работы велись с 1936 по 2015 гг.) разрабатывались месторождения серпинтин-оливинитовых, флогопитовых и вермикулитовых руд, предприятием «Мусковит» (начало 1950-х гг. – 1995 г.) – месторождение мусковитовых руд.

***Металлургическая промышленность.*** В конце 1938 г. был построен комбинат «Североникель», включающий плавильный комплекс по производству электролитного никеля, меди, никелевого порошка высокого качества, кобальтового концентрата, драгоценных металлов, серной кислоты. До 1960 г. использовалась местная руда (рудник «Ниттис-Кумужье» на водосборе оз. Имандра) с высоким содержанием металлов и низким содержанием серы. До 1950 г. производство никеля и меди не превышало 10 000 и 6300 т соответственно. Затем в основном стала использоваться руда из Норильска (400 тыс. т/год), содержание сульфатов в которой в 3 раза выше.

С 1940 г. комбинат сбрасывает сточные воды в северо-западную часть оз. Имандра – оз. Нюдъявр и далее в губу Монче. Объем сточных вод в период 1976–1994 гг. изменялся в пределах 21,9–27,2 млн $м^3$/год. В их составе – медь, никель, ртуть, марганец, сульфаты, цинк, нефтепродукты, органические вещества, дитиофосфат [Доклад о состоянии..., 2020]. АО «Кольская ГМК», как и любое промышленное предприятие, оказывает негативное воздействие на окружающую среду, но в то же время инвестирует крупные суммы в модернизацию производственных мощностей, внедрение новых технологий.

***Железорудное производство.*** С 1955 г. в северной части водосбора оз. Имандра действует Оленегорский горно-обогатительный комбинат, который добывает и обогащает железные руды – магнетит-гематитовые кварциты. До 1975 г. стоки комбината поступали в северную часть плеса Большая Имандра, в их состав входили гематитовые шлаки, железо, марганец, ванадий. В 1975 г. на производстве было введено 100 %-ное оборотное водоснабжение, позволившее сократить объем стоков. Сейчас в эту же часть озера поступают сточные воды Оленегорского механического завода, содержащие медь, цинк, взвешенные вещества, фенолы и нефтепродукты.

***Хозяйственно-бытовое загрязнение.*** Большую нагрузку на водоемы оказывают муниципальные стоки. Экономический кризис 1990-х гг. привел к резкому падению объемов производства на всех горнорудных и металлургических предприятиях и, соответственно, к значительному уменьшению населения. В современный период на берегах оз. Имандра сосредоточена почти четверть (23,7 %) населения Мурманской области: 175,68 тыс. человек – на 2019 г. В 1990 г. население городов и поселков на территории водосбора оз. Имандра – более 300 тыс. человек, общий объем коммунальных стоков составлял около 100 тыс. $м^3$/сут.

Общий объем сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты и содержащих загрязняющие вещества, в 2019 г. составил 274,49 млн $м^3$.

По наблюдениям специалистов «Главмурманрыбвода», в 1959 г. в Йокостровском проливе на поверхности была поймана сачком еще живая, плавающая кверху брюхом ряпушка общим весом более 2 кг. В том же году в июле на пляже был собран 31 кг мертвой мелкой рыбы, а в августе – насколько хватало глаз – плавала мертвая рыба, в основном сиги.

***Аэротехногенное загрязнение*** [Доклад о состоянии…, 2020]. В 2019 г. суммарные выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферный воздух Мурманской области от стационарных и передвижных (автомобильный транспорт) источников составили 252,866 тыс. т, в том числе: твердых веществ – 27,2 тыс. т (10,8 %), диоксида серы ($SO_2$) – 156,594 тыс. т (61,9 %), оксида углерода (CO) – 35,399 тыс. т (14,0 %), оксидов азота ($NO_x$) – 19,887 тыс. т (7,9 %), углеводородов (без летучих органических соединений, ЛОС) – 8,784 тыс. т (3,5 %), летучих органических соединений (ЛОС) – 4,064 тыс. т (1,6 %) и прочих загрязняющих веществ – 0,938 тыс. т (0,4 %) (табл. 2).

**Таблица 2.** Выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных (автомобильный транспорт) источников в Мурманской области за 2019 г. (тыс. т)

**Table 2.** Emissions of major air pollutants from point sources and traffic (cars) in the Murmansk Region in 2019 (1000 tons)

| Источники | Всего | Твердые вещества | Газообразные и жидкие вещества | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $SO_2$ | CO | $NO_x$ | Углеводороды (без ЛОС) | Летучие органические соединения | Прочие |
| Стационарные | 231,166 | 27,1 | 156,434 | 19,099 | 15,987* | 8,744 | 3,164 | 0,638 |
| Передвижные (автотранспорт) | 21,7 | 0,1 | 0,16 | 16,3 | 3,9 | 0,04 | 0,9 | 0,3 |
| Суммарные выбросы | 252,866 | 27,2 | 156,594 | 35,399 | 19,887 | 8,784 | 4,064 | 0,938 |

* *Примечание.* Оксиды азота (в пересчете на $NO_2$).

Динамика выбросов основных загрязняющих веществ от стационарных и передвижных (автомобильный транспорт) источников в атмосферный воздух Мурманской области за 2015–2019 гг. представлена на рис. 7, 8.

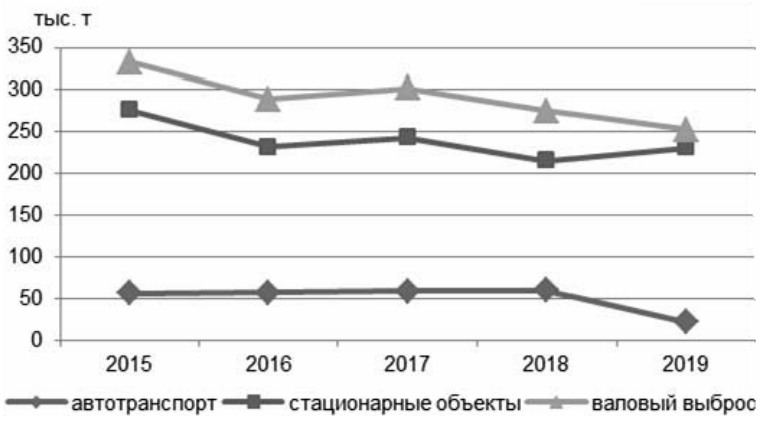



**Рис. 7.** Динамика выбросов основных загрязняющих веществ от стационарных и передвижных (автомобильный транспорт) источников в атмосферный воздух Мурманской области (2015–2019)

**Fig. 7.** Changes in emission volumes of major air pollutants from point sources and traffic (cars) in the Murmansk Region (2015–2019)

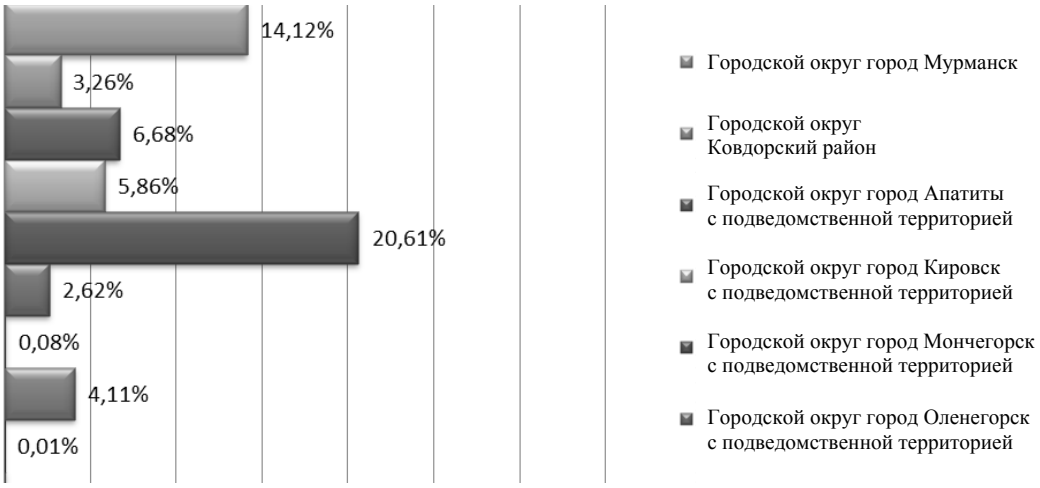



**Рис. 8.** Выбросы основных загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух по муниципальным районам и городским округам Мурманской области в 2019 г. (водосбор оз. Имандра – 23,23 %)

**Fig. 8.** Emissions of major air pollutants from point sources in municipalities of the Murmansk Region in 2019 (Lake Imandra catchment area – 23.23 %)

***Энергетика.*** В 1934 г. на единственном стоке из оз. Имандра – р. Ниве – была сооружена ГЭС Нива-II, а в 1952 г. – ГЭС Нива-I (рис. 9), приведшая к зарегулированию стока, что нарушило естественный ход колебаний уровня воды в озере. В 1973 г. на берегу оз. Имандра была введена в строй Кольская АЭС. Сброс промышленных вод, используемых для охлаждения реакторов Кольской АЭС, привел к повышению температуры воды, активизации круговорота элементов и биохимических процессов в водоеме. Термальный фактор воздействует локально и характерен только для губы Молочной оз. Имандра (до 26 °С).

Всего водные ресурсы р. Нивы, а следовательно, и оз. Имандры, используются на трех гидроэлектростанциях каскада. Обладая небольшой мощностью, каскад Нивских ГЭС оказывает существенное влияние на экосистему оз. Имандра. Среднемноголетние расходы и сток представлены в табл. 3. При низком горизонте в оз. Имандра с целью его быстрейшего повышения осенью и в начале зимы производится перепуск воды из Пиренгского водохранилища. В интересах рыбного хозяйства интенсивность сработки ограничивается величиной 5 см/сут. В период нереста рыб после достижения приточности 200 м³/сут снижение горизонта запрещается.

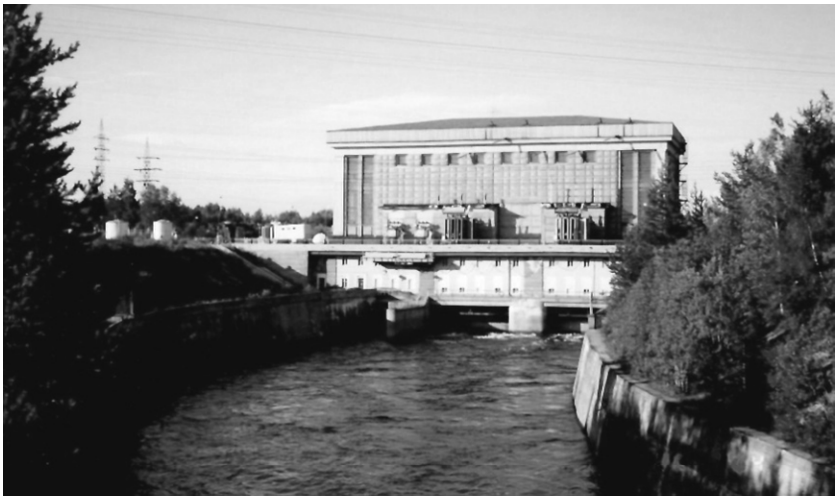


**Рис. 9.** ГЭС Нива-1

**Fig. 9.** Niva-I hydroelectric power plant

**Таблица 3.** Среднемноголетние расходы и сток в створах подпирающих гидроузлов

**Table 3.** Average annual discharge and flow through bulkhead cross-sections

| Наименование створа | Расход воды, м³/с | Сток, км³/год | | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| | | Всего | в т. ч. весеннего половодья (V–VII) | |
| Пиренгское регулирующее сооружение | 49,0 | 1,52 | 0,695 | с учетом стока из Пиренгского водохранилища |
| ГЭС Нива-1 | 152,0 | 4,79 | 2,6 | |

*Примечание.* Расчетный ряд лет с 1925 по 2002 гг.

Анализ годовой сработки уровня воды озера за период с 1964 по 2020 гг. показал, что только в 6 случаях уровень воды достигал НПУ и ни разу не снижался до горизонта мертвого объема. Нарушение правил использования водных ресурсов оз. Имандра в средние и многоводные годы наблюдалось в 1964, 1970, 1974, 1981, 2014 и 2019 гг. Величина сработки уровня водохранилища ниже установленной отметки (126,00 м) составляла: 1974 г. – 0,56 м; 1981 г. – 0,43 м; 2014 г. – 0,09 м; 2019 г. – 0,12 м (рис. 10).

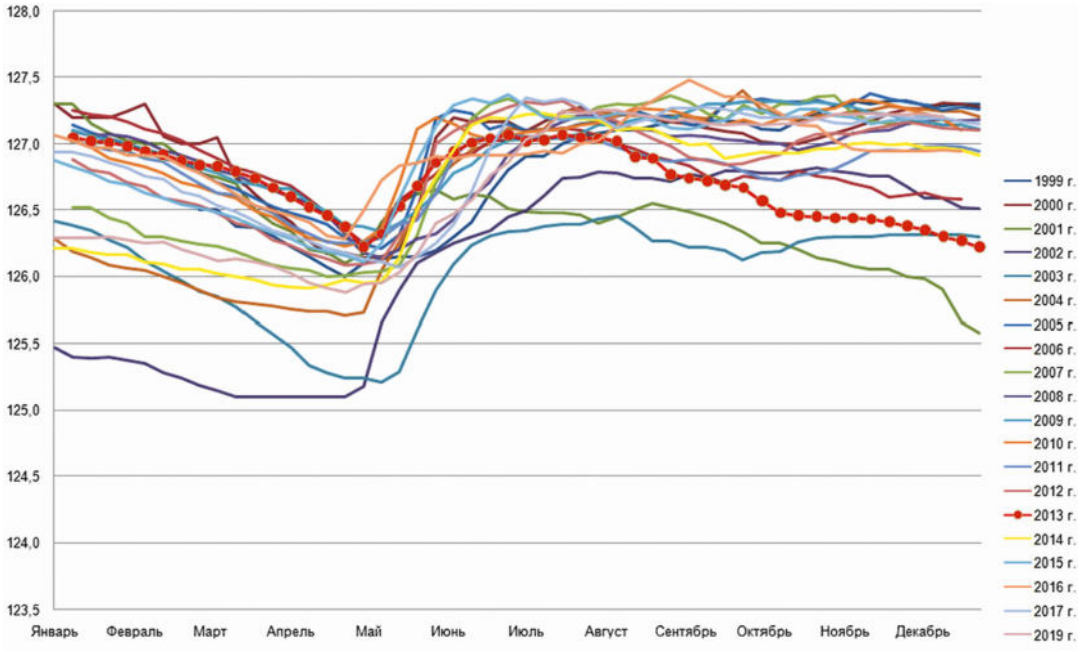



**Рис. 10.** Динамика уровней воды в Йокостровской Имандре

**Fig. 10.** Water level dynamics in Yokostrovskaya Imandra

В сезон 1958–1959 и 1960 гг., когда уровень оз. Имандра был понижен на 5,2 м, из озера было изъято 3,7 км$^3$ воды, что составило 36 % всего водного объема (данные МУГМС), водная поверхность озера уменьшилась на 350 км$^2$. Это резко отразилось на условиях жизни рыб и сократило ее численность.

***Рыбоводство.*** Создание Имандровского озерного рыбного хозяйства в 1960-х гг. считалось целесообразным, эффективным и необходимым, диктовалось растущими потребностями населения в высококачественной рыбной продукции. Уже к тому времени рыбный промысел на внутренних водоемах области находился далеко не в блестящем состоянии, количество выловленной рыбы держалось примерно на одном уровне, но качество ее по ассортименту резко снижалось. В 1933 г. количество лососевых рыб – кумжи (300 ц), гольца и сига – составляло 75 % всего улова, в 1961 г. всего 30 % (кумжа на базу не поступила).

Промысел почти не регулировался, велся в основном на нерестилищах и на подходах к ним. В 1946 г. на оз. Имандра работало не менее 20 рыболовецких бригад, рыбаки ставили сети и мережи, перегораживали устья рек. Несколько бригад из «Мурманрыбпрома» устанавливало по 120 сетей и 15 мереж, всего на оз. Имандра стояло до 30 км сетей, а годовой улов достигал 30 т. Озеро не выдержало такой нагрузки, и уловы ценных пород рыбы резко упали. Даже сейчас эти популяции не восстановились.

***Лесная промышленность.*** Вырубка леса на территории водосбора, а затем его молевой сплав Зашейковским леспромхозом проводились на реках Пиренга и Каменная. Было еще несколько мест складирования леса на берегах Йокостровской и Большой Имандры. Затем лес в кошелях транспортировался по оз. Имандра к Зашейковскому лесокомбинату (1925–1995). Полностью сплав и транспортировка прекращены в 1987 г. согласно Постановлению Совета министров РСФСР.

**3. Лаборатория водных экосистем ИППЭС: современные исследования.** Созданию Лаборатории водных экосистем (Лаборатория 22) в Институте проблем промышленной экологии Севера предшествовал ряд исследований водно-экологического направления, которые развивались в Кольском филиале АН СССР (рис. 11). В 1968 г. в Отделе энергетики при Горном институте КФ АН СССР была создана группа по исследованию вод суши Кольского Севера под руководством Г. В. Беляевой (ихтиолог), которая включала группу гидрохимиков во главе с В. В. Чижиковым.



**Рис. 11.** Строительство Академгородка (1961), г. Апатиты

**Fig. 11.** Science campus under construction (1961), Apatity

На примере крупнейшего озера Кольского Севера рассматривались основные закономерности трансформации параметров водной химии под влиянием различных видов загрязнения, так как размещение основных производительных сил Мурманской области приходится на центральный район (водосбор оз. Имандра).

В конце 1968–1971 гг. этот небольшой коллектив проводит комплексные экспедиционные работы в плесе Большая Имандра. В фокусе исследований – детальные гидрохимические и биологические (ихтиологические) исследования. Результаты этих пионерных исследований находят отражение в окончательном отчете [Беляева и др., 1972] под грифом ДСП.

В 1970 г. по запросу КФ АН СССР на практику приехала Т. И. Моисеенко. В это время еще не функционировала Кольская АЭС и Бабинская Имандра была абсолютно не тронутым человеческой деятельностью плесом. Результаты исследований отражены в заключительном отчете [Чижиков и др., 1976], в котором наряду с гидрохимическими и ихтиологическими появились результаты гидрологических и гидробиологических исследований.

Эти два фундаментальных отчета впервые дали обобщенное представление об элементах экосистемы оз. Имандра. По результатам исследований всех трех плесов впоследствии издается в Кольском научном центре монография в двух томах, посвященная результатам исследований оз. Имандра [1980, под ред. В. В. Чижикова] с грифом ДСП. Однако в работах не было сфокусировано внимание на загрязнении, которое уже могло проявиться в тот период. Эти работы сформировали представления о природных характеристиках крупных озер Кольского Севера, хотя и отрывочные, неполные, но приобретающие с годами большую ценность для понимания в дальнейшем антропогенных модификаций озер [Моисеенко, Яковлев, 1990; Моисеенко, 2019].

До 1985 г. распространялись ограничения на публикацию любых исследований по влиянию загрязнения. Они автоматически попадали под статью «Большие масштабы бесхозяйственной деятельности», не говоря уже о публикации данных по концентрациям тех или иных элементов в воде или донных отложений. Поэтому публикационная активность в этот период не могла быть высокой. Статьи получались выхолощенные, неинтересные.

В 1978 г. по инициативе Председателя Президиума КФ АН СССР, члена-корреспондента АН СССР Г. И. Горбунова организовывается Лаборатория охраны природы под руководством д.б.н. В. В. Крючкова. Группа водно-экологических исследований, которую возглавила Т. И. Моисеенко, вливается в лабораторию. В этот период в лабораторию входят подразделения по изучению качества воздуха, состояния почв и другие. Приходит понимание, что катастрофические последствия масштабного загрязнения требуют комплексного исследования. Перед молодыми учеными была поставлена задача – исследовать влияние промышленных выбросов и стоков на экосистемы и их структурные элементы.

Организовываются крупные экспедиции (1978–1988), которые отправляются исследовать очаги загрязнения на оз. Имандра: губа Белая – влияние стоков апатит-нефелинового производства, губа Монче – влияние стоков комбината «Североникель», губа Молочная – влияние теплых вод Кольской АЭС [Крючков и др., 1985]. Исследованиями равномерно охватываются и другие водные системы, включая незагрязненные. Для гидробиологических исследований приглашается на работу Яковлев В. А., приходят ихтиологи – Лукин А. А., Кашулин Н. А. Это был хороший плодотворный период в целом в науке – ученые определяли сами научные направления, цели и план экспедиционных работ, которые в обязательном порядке защищались на Ученом совете. Подавалась заявка, и согласно плану снаряжалась экспедиция, собирался и анализировался материал, писались отчеты.

В этот период вместо публикаций бóльшую часть времени занимает сбор бесчисленного количества справок для руководящих органов (отделы обкома, горкома) и других структур о состоянии окружающей среды, блок качества вод. К сожалению, обратной связи не было, что возможно впоследствии сыграло роль для выхода Постановления о создании Института [Моисеенко, 2019].

Впервые в 1978–1979 гг. регистрируются глубокие нарушения арктических экосистем. Первые обследования рыбной части сообществ выявили патолого-физиологические нарушения у рыб, которые имели яркие проявления и требовали подключения физиологических методов обследования. Группа отправляется в поликлинику Кольского филиала, где снабжается необходимым оборудованием для измерения гематологических показателей, фиксации проб на биохимию и гистологию, на определение накопления металлов. Впервые были выявлены массовое заболевание рыб почечнокаменной болезнью, миопатия и нарушение белкового обмена, патологии системы кроветворения. Разработана система диагностики, которая давала численные значения патологий и критериев оценки качества вод. Одновременно детально исследовалась гидрохимия, велось изучение концентраций экотоксикантов в воде.

В 1985 г. снимается гриф ДСП на публикацию результатов экологических исследований и открывается путь для открытых публикаций. Издаются две монографии, выходит ряд статей в изданиях Кольского научного центра.

Таким образом, к началу создания ИППЭС КНЦ РАН успешно функционировала творческая ячейка, активно работающая по изучению водных систем Кольского Севера, в фокусе исследований которой – крупные озера. В составе основной исследовательской группы – Яковлев Валерий Анатольевич, Кудрявцева Любовь Павловна, Лукин Анатолий Александрович и Моисеенко Татьяна Ивановна как руководитель группы. Большой вклад в экспедиционные и аналитические работы вносят Платоненкова Галина Сергеевна, Кругликова Елена и другие.

В 1989 г. с созданием Института на базе группы формируется Лаборатория водных экосистем. Из Мурманского морского биологического института переходят Бобров Юрий Алексеевич и Бардан Сергей Иванович. Наряду с существующим составом в лабораторию приходит большая группа молодых ученых: Даувальтер Владимир, Родюшкин Илья, Вандыш Оксана, Королёва Ирина, Сандимиров Сергей, Шаров Андрей, Шарова Юлия, Малиновский Дмитрий. Приглашаются специалисты из других регионов страны – Ильяшук Борис (бентос) и Ильяшук Елена. Общая численность лаборатории достигает 18 человек. Молодые ученые активно влились в исследовательский процесс (рис. 12).



**Рис. 12.** Научно-исследовательская база и плавсредства ИППЭС (БМК-130М) на оз. Имандра (с 1990 г.)

**Fig. 12.** INEP Research and development facility and watercraft on Lake Imandra (since 1990)

При создании лаборатории формируются новые научные направления:

– изучение формирования качества вод и донных отложений: формы миграции, ковариации и седиментации тяжелых металлов;

– структурно-функциональная организация водных экосистем и их биоразнообразие, модификации под влиянием загрязнения;

– особенности развития антропогенно-индуцированных процессов в водах арктических широт: закисление, эвтрофирование и токсичное загрязнение;

– влияние токсичных веществ на организм, популяции и сообщества, патофизиологические нарушения в организме рыб;

– критерии диагностики нарушений в водных экосистемах по показателям сообществ и состояния организма рыб;

– обоснование критических уровней и нагрузок поступления загрязняющих веществ для водных экосистем, разработка рекомендаций по улучшению качества вод.

Рабочий, творческий процесс лаборатории строился таким образом, чтобы каждый специалист имел свой блок, был составной частью структурно-функциональной организации водной экосистемы. Лаборатория представляла слаженный механизм исследовательского процесса. Сотрудники коллектива начинают активно публиковаться – в журналах «Водные ресурсы», «Экология», «Геохимия», «Зоологический журнал», а также в международных изданиях. Развивается международное сотрудничество.

Все молодые ученые активно работали над диссертационными работами, которые впоследствии все защитили. Работы защищались в ведущих по профилю институтах Ленинграда и Москвы. Впоследствии развитие экологического направления в исследованиях вод суши Севера и создание в КНЦ РАН научной школы было отмечено Дипломом 1 степени КНЦ РАН, а Моисеенко Т. И. была награждена медалью ордена «За заслуги перед Отечеством».

Развивалось международное сотрудничество со скандинавскими странами (Швецией, Норвегией, Данией) и Финляндией, а также коллектив был включен в выполнение ряда крупных европейских проектов. Это позволило придать лаборатории международный статус и обеспечить ее современным аналитическим оборудованием, сотрудники стали участвовать в международных конференциях и симпозиумах. Организовывались совместные международные экспедиции с учеными институтов Норвегии (NIVA и NINA), Финляндии (Лапландский округ окружающей среды, Институт лимнологии Финляндии) и Швеции (Институт природы Университета Уппсала, Университет Умео). В первую очередь стояла задача – поднять качество аналитических измерений до международного уровня. Были поездки на стажировки по исследованию вод в ведущие скандинавские институты. В сжатые сроки удалось поднять уровень аналитических измерений и включиться в международные интеркалибрации с высокой результативностью. В сотрудничестве с учеными Норвегии появляется подразделение – гидрохимики более тесно сотрудничают с Норвежским институтом исследования вод (NIVA), биологи – с Норвежским институтом исследования природы (NINA).

В этот период лаборатория наряду с двусторонними проектами включается в крупные международные программы.

С 1992 г. в составе исследовательских групп из 22 стран мира лаборатория выполняет "International cooperative program on Assessment and Monitoring of Acidification of Rivers and Lakes". Именно в рамках этой программы ежегодно (по настоящее время) проводятся международные интеркалибрации. Впервые появляются работы, доказывающие закисление вод в регионах, построены первые карты критических нагрузок и их превышений по фактору закисления вод (публикация в AMBIO, 1994).

При общей поддержке Министерства Северных стран в 1995 г. совместно со скандинавскими странами стартует проект "Common Regional lake surveys in the Barents region (Finland, Norway, Sweden, Denmark, Scotland and Wales)". Во время одного из визитов Arni Willander (шведский коллега) выдвигает идею о необходимости финансового обеспечения исследований на Кольском полуострове, которые проводятся раз в 5 лет европейскими странами и странами Северной Америки. Его поддерживают Karry Kinnunen и Tor Traen, финский и норвежский коллеги, и институт получает финансовое обеспечение данных работ.

В эти годы ИППЭС включается в крупный европейский проект (MOLAR), целью которого было изучение горных озер "Measuring and modeling the dynamic response of remote mountain lake ecosystems to environmental change" при поддержке Лондонского университета (Отдела изменений окружающей среды). Цель проекта – наряду с оценкой современного состояния оценить палеоэкологическую динамику окружающей среды по состоянию донных отложений и диатомовой флоры. Донные отложения исследует Даувальтер В. А., диатомовые комплексы – Каган Л. Я. В проекте принимают участие 36 лабораторий из стран Европы. Проект финансово поддержан Европейской комиссией ЕС под руководством профессора Richard Batterbe. ИППЭС в рамках данного проекта успешно проходит все интеркалибрации. Мониторинговые работы на горном озере в Чуна-тундре продолжались 5 лет и требовали довольно сложных походов.

Интересный двусторонний проект был с Университетом Умео (Швеция) по изучению миграции и ковариации элементов в оз. Имандра.

В конце 1990-х гг. проявляют интерес к исследованиям на Кольском полуострове сотрудники Американской ассоциации содействия науке, разрабатывается проект "Applications of Interactive Integrated Assessment and Modeling to Design Sustainable Development Strategies for Arctic Watersheds". Доктор Войнов Алексей представлял американскую сторону в проекте. В этом проекте основное внимание уделяется оз. Имандра и структуре возможного управления экологической ситуацией на его водосборе. Проводится ряд экспедиций, подготовлена крупная обобщающая монография коллективом авторов «Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра» [2002].

В 1997 г. Общим собранием Российской академии наук Моисеенко Т. И. избрана членом-корреспондентом Российской академии наук по специальности «Водные ресурсы». В 1999 г. (по приглашению академика Хубларяна М. Г.) – занимает должность зам. директора по науке Института водных проблем (ИВП) РАН. В ИВП РАН и Институте озероведения продолжаются защиты докторских и кандидатских диссертаций сотрудников ИППЭС. В этот период многие сотрудники Лаборатории 22 (водных экосистем) уезжают и начинают успешно работать в других научных учреждениях России и зарубежья и занимать в науке ключевые посты.

**Заключение.** Подводя итог краткому изложению истории развития водно-экологических исследований в Институте проблем промышленной экологии Севера, можно утверждать, что была сформирована, с участием Моисеенко Т. И., научная школа по водной экологии, направленная на изучение формирования качества вод в условиях антропогенных нагрузок и изучения ответных реакций биологических систем на загрязнение.

## Литература


Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / отв. ред. Т. И. Моисеенко. М.: Наука, 2002. 487 с.

*Беляева Г. В., Чижиков В. В., Воробьева Д. Г., Дольник Т. В., Косинова Н. Р.* Комплексное изучение и охрана озера Имандра // Отчет НИР. Апатиты: Фонды Кольского филиала АН СССР, 1972. 339 с.

Большие озера Кольского полуострова. Л.: Наука, 1976. 349 с.

Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2019 году. Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области. Мурманск, 2020. 177 с.

*Крючков В. В., Моисеенко Т. И., Яковлев В. А.* Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья. Апатиты: КФ АН СССР, 1985. 132 с.

*Кудрявцев Н. В.* Кольский полуостров. Физико-географический очерк (Описание поездки на Белое море и перехода пешком через перешеек Кольского полуострова 1880 г.) // Труды С.-Петерб. о-ва естествоиспытателей. Т. XII, вып. 2. СПб.: Тип. В. Демакова, 1882. С. 233–267.

Материалы к изучению поверхностных вод Кольского полуострова / Фонды КНЦ АН СССР. Сб. 1. Мурманск, 1940. 406 с.

*Моисеенко Т. И., Яковлев В. А.* Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. 220 с.

*Моисеенко Т. И.* Развитие водно-экологического направления исследований на Кольском Севере и в Институте проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (воспоминания о первом десятилетнем периоде) // В сборнике материалов к юбилею института. ИППЭС КНЦ РАН: 30 лет – полет нормальный. Апатиты: КНЦ РАН, 2019. С. 42–55.

Озера различных ландшафтов Кольского полуострова. Часть II. Л.: Наука, 1974. 235 с.

Отечественные физико-географы и путешественники / под ред. Н. Н. Баранского. М.: Учпедгиз, 1959. 783 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Мурманская область / под ред. Ю. Л. Елшина. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. Т. 1. 316 с.

*Рихтер Г. Д.* Очерк исследования района оз. Имандра // Труды Мурм. биол. станции. Мурманск, 1926. Т. 2. С. 32–68.

*Рихтер Г. Д.* Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. Л.: Гос. технико-теоретическое изд., 1934. 144 с.

Рыбы Мурманской области. Мурманск, 1966. 336 с.

*Чижиков В. В., Воробьева Д. Г., Моисеенко Т. И.* Комплексное изучение Йокостровской и Бабаинской Имандры и разработка рекомендаций по рациональному использованию водоема // Отчет НИР. Апатиты: Фонды Кольского филиала АН СССР, 1976. Т. 1. 269 с.

*Яковлев В. А., Кашулин Н. А.* Об истории лимнологических исследований на Кольском Севере // Вестник Кольского научного центра РАН, 2012. № 4(11). С. 117–139.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Сандимиров Сергей Степанович**
старший научный сотрудник
лаб. водных экосистем, к.г.н.
Институт проблем промышленной экологии Севера,
ФИЦ «Кольский научный центр РАН»
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты,
Мурманская область, Россия, 184209
эл. почта: s.sandimirov@ksc.ru

**CONTRIBUTORS:**

**Sandimirov, Sergey**
Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre RAS
14a, Akademgorodok, 184209, Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: s.sandimirov@ksc.ru




TOSHIBA








Евгений Борови...
Pavel Ryazantsev





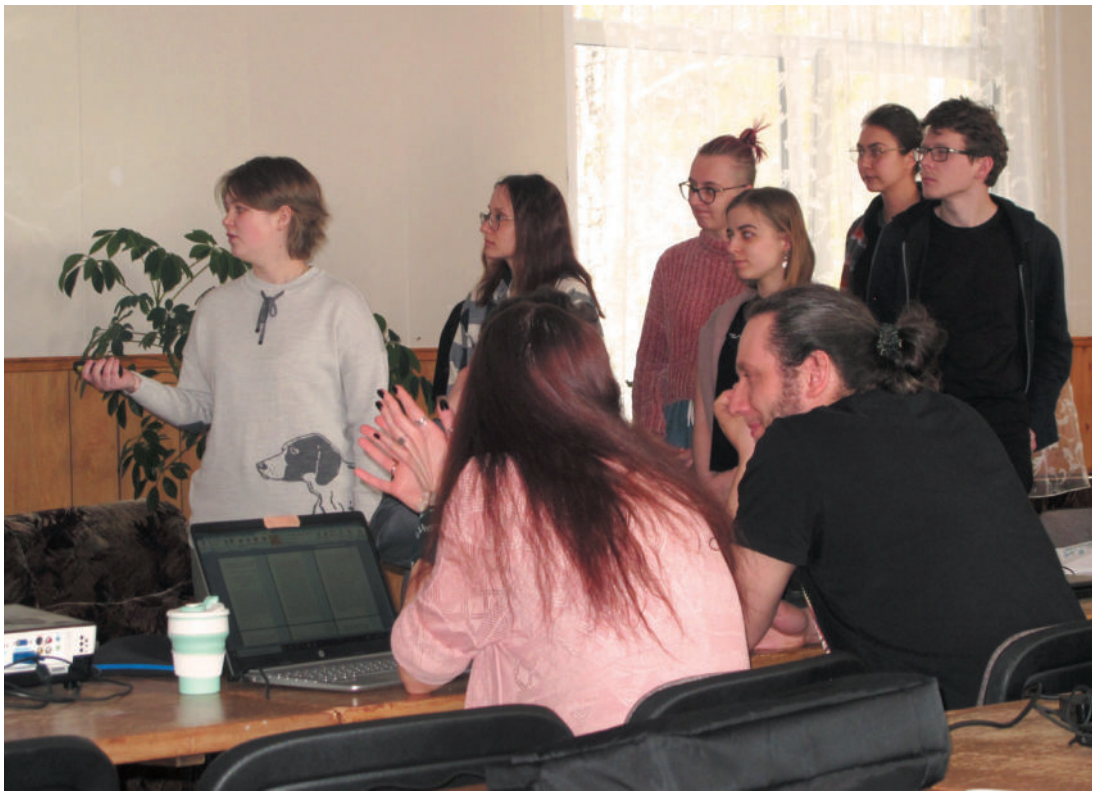





ПОЛЯРНАЯ ШКОЛА-ПРАКТИКА
«ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ:
ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ»
ИХТИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРА

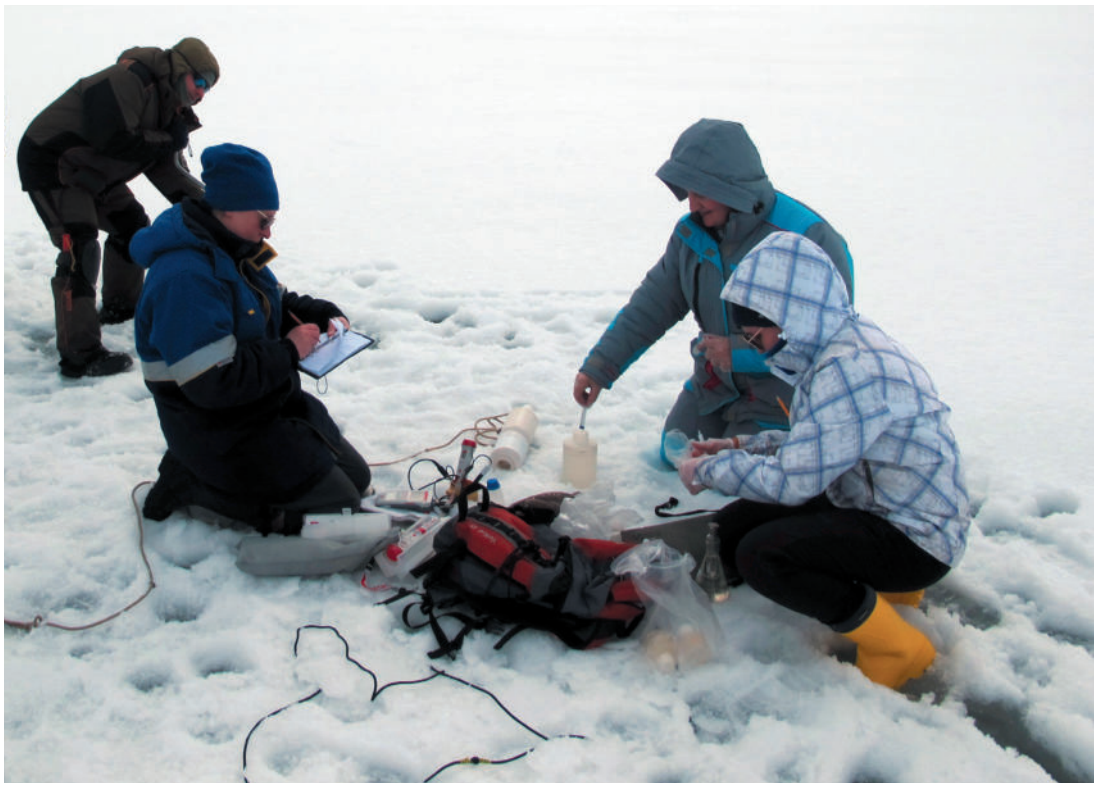




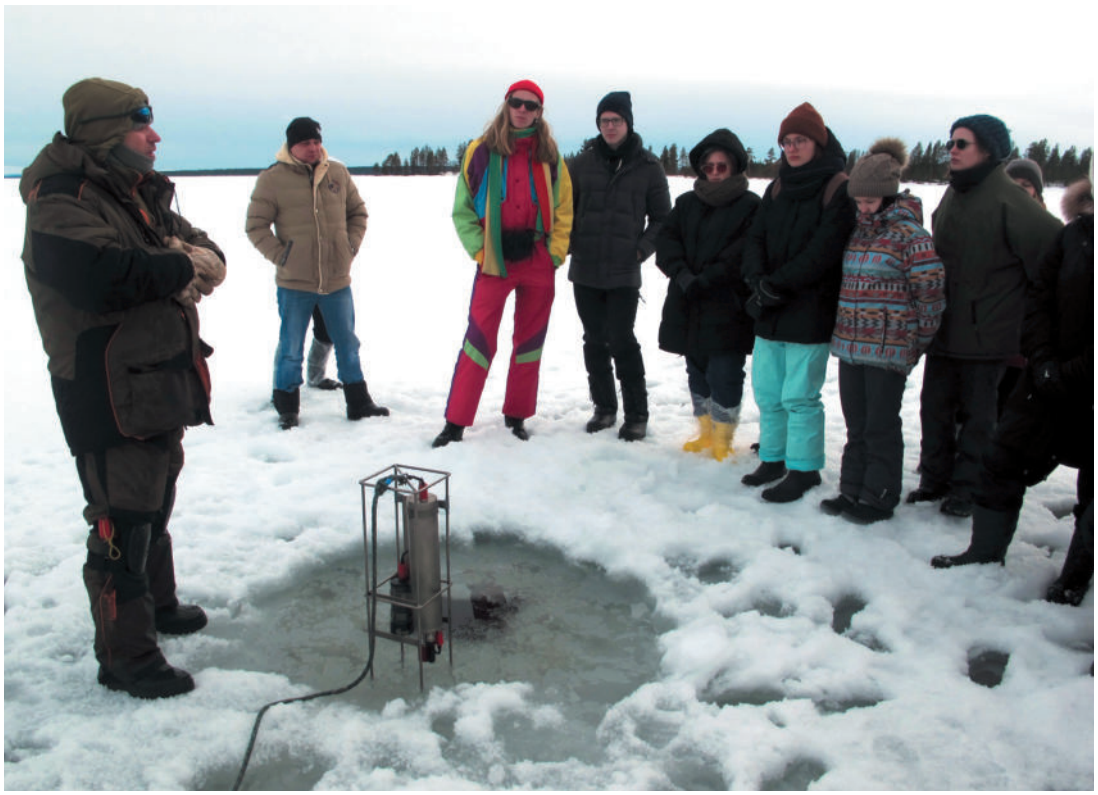


























































## СОДЕРЖАНИЕ

***Предисловие*** . . . . . 3

**География. Климат** . . . . . 5

*Назарова Л. Е.* Климатические условия на территории Карелии . . . . . 7

*Антонова Р. Ф., Щеколдина И. В.* Водные объекты суши. Гидронимы и способы их изучения . . . . . 17

*Литвиненко А. В.* Основные особенности гидрографической сети и водных ресурсов Карелии . . . . . 25

*Гриппа С. П., Потахин С. Б.* Дендроиндикация как метод исследований природных процессов и явлений (Восточная Фенноскандия) . . . . . 37

**Гидрохимия** . . . . . 53

*Галахина Н. Е.* Техногенное влияние на водные объекты Северной Карелии . . . . . 55

*Даувальтер В. А., Сандимиров С. С.* Особенности гидрохимии озер Кольского Севера . . . . . 75

*Даувальтер В. А., Слуковский З. И.* Химический состав донных отложений озер Мурманской области . . 95

*Фрумин Г. Т.* Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема . . . . . 113

**Гидробиология** . . . . . 121

*Денисов Д. Б.* Биоиндикация состояния арктических пресноводных экосистем . . . . . 123

*Терентьев П. М., Зубова Е. М., Королёва И. М., Кашулин Н. А., Мелехин А. В., Бочкарёв Н. А.* Ихтиологические исследования пресноводных экосистем Севера . . . . . 146

**Гидрофизика** . . . . . 163

*Здоровеннов Р. Э., Кураев А. В., Здоровеннова Г. Э., Фёдорова И. В.* Организация и проведение научных измерений на покрытых льдом озерах . . . . . 165

*Богданов С. Р., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э.* Использование акустических профилографов для изучения гидрофизических параметров геофизических течений . . . . . 177

**История исследований** . . . . . 195

*Сандимиров С. С.* История исследований Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) на озере Имандра . . . . . 197

## CONTENT

***Prefake*** . . . . . 3

**Geography. Climate** . . . . . 5

*Nazarova L. E.* Climatic conditions in the Republic of Karelia. . . . . 7

*Antonova R. F., Shchekoldina I. V.* Inland waters. Methods of studying hydronyms . . . . . 17

*Litvinenko A. V.* Main features of the hydrographic network and water resources of Karelia . . . . . 25

*Grippa S. P., Potakhin S. B.* Dendroindication as a method for studying natural processes and phenomena (Eastern Fennoscandia) . . . . . 37

**Hydrochemistry** . . . . . 53

*Galakhina N. E.* Technogenic impact on water bodies in Northern Karelia . . . . . 55

*Dauvalter V. A., Sandimirov S. S.* Peculiarities of lake hydrochemistry in the Kola North . . . . . 75

*Dauvalter V. A., Slukovskii Z. I.* Chemical composition of lake sediments in the Murmansk region . . . . . 95

*Frumin G. T.* Water eutrophication – a global environmental problem . . . . . 113

**Hydrobiology** . . . . . 121

*Denisov D. B.* Bioindication of arctic freshwater ecosystems . . . . . 123

*Terentjev P. M., Zubova E. M., Koroleva I. M., Kashulin N. A., Melekhin A. V., Bochkarev N. A.* Ichthyological research as a component of North freshwater ecosystems research. . . . . 146

**Hydrophysics** . . . . . 163

*Zdorovennov R. E., Kouraev A. V., Zdorovennova G. Z., Fedorova I. V.* Organization of scientific work on ice-covered lakes . . . . . 165

*Bogdanov S. R., Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Zdorovennova G. Z.* ADCP insight into the hydrophysics of geophysical currents . . . . . 177

**History of research** . . . . . 195

*Sandimirov S. S.* History of Lake Imandra research by the Institute of North Industrial Ecology Problems (INEP) 197

Учебное издание

**СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ СЕВЕРА**

*Учебное пособие*

**MODERN RESEARCH ON NORTHERN WATER BODIES**

*Textbook*

*Печатается по решению Ученого совета Института водных проблем Севера КарНЦ РАН при поддержке Министерства образования и спорта Республики Карелия*

Ответственный за выпуск *С. П. Гриппа*
Редактор *Е. В. Азоркина*
Английский текст *О. С. Кислова*
Оригинал-макет *Т. Н. Люрина*
Оформление обложки *А. В. Толстиков, М. С. Богданова*
Фотографии *А. В. Толстиков, К. П. Данилин, З. И. Слуковский*

*Представлены фото с работы Полярной школы-практики (2-й этап VI Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление»)*

Подписано в печать 05.10.2021. Формат 60×84 1/8.
Гарнитура Times. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 20,7. Усл. печ. л. 24,88 + усл. печ. л. вкл. 1,63.
Тираж 300 экз. Заказ № 00

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Редакционно-издательский отдел
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50