

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# ОЗЁРА ГОРОДА МУРМАНСКА: ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ, ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА

З. И. Слуковский, Д. Б. Денисов, В. А. Даувальтер, Е. М. Зубова, В. А. Мязин,  
А. В. Гузева, А. А. Черепанов, М. А. Постевая, С. А. Валькова, П. М. Терентьев,  
Н. В. Фокина, А. Л. Косова, С. В. Постнова, А. С. Сошина

**ОЗЁРА ГОРОДА МУРМАНСКА:  
гидрологические, гидрохимические  
и гидробиологические особенности**

Апатиты  
Издательство ФИЦ КНЦ РАН  
2023

УДК 581.5:502.72  
ББК 28.081 М 54  
О-46

**Коллектив авторов:**

Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Даувальтер В. А., Зубова Е. М., Мязин В. А.,  
Гузева А. В., Черепанов А. А., Постевая М. А., Валькова С. А., Терентьев П. М.,  
Фокина Н. В., Косова А. Л., Постнова С. В., Сошина А. С.

**Рецензенты:**

*Ильмаст Н. В.*, д-р биол. наук, заместитель генерального директора  
Карельского научного центра РАН, заведующий лабораторией ихтиологии  
и водных беспозвоночных Института биологии КарНЦ РАН;  
*Удачин В. Н.*, д-р геол.-минерал. наук,  
председатель Южно-Уральского научного центра УрО РАН

**Научный редактор**

*Моисеенко Т. И.*, чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, заведующая отделом биогеохимии  
и экологии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

О-46 Озёра города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и  
гидробиологические особенности : монография / З. И. Слуковский, Д. Б. Денисов,  
В. А. Даувальтер [и др.] ; научный редактор Т. И. Моисеенко. — Апатиты : Изд-во  
ФИЦ КНЦ РАН, 2023. — 174 с. : ил.

ISBN 978-5-91137-471-6

Подводится итог четырехлетних исследований озер, расположенных на территории Мурманска — крупнейшего города за Северным полярным кругом. Авторами собраны сведения об основных морфометрических особенностях озер, о химическом составе воды и донных отложений, о ключевых источниках загрязнения водных объектов и всей окружающей среды г. Мурманска, а также о живых организмах (планктон, бентос, ихтиофауна), обитающих в городских озерах. В результате проведенных комплексных работ было оценено современное экологическое состояние мурманских озер, показана взаимосвязь биотических и абиотических показателей и даны рекомендации по дальнейшему использованию городских водных объектов с учетом того, что они постоянно используются местными жителями и гостями города в рекреационных целях. Библиографический список — 232 назв.

*Исследования выполнены за счет гранта РНФ № 19-77-10007  
«Экологическая оценка и прогноз устойчивого функционирования водных экосистем  
урбанизированных территорий в Арктической зоне»,  
а также в рамках тем НИР № FMEZ-2021-0043 и № FMEZ-2022-0008.*

Фотография на обложке — Слуковский З. И.

Научное издание  
Редактор С.А. Шарам  
Технический редактор В.Ю. Жиганов  
Корректор С.А. Шарам  
Подписано в печать 10.07.2023. Формат бумаги 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 15,23. Заказ № 12. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-91137-471-6  
DOI:10.37614/978.5.91137.471.6

© Коллектив авторов, 2023  
© Кольский научный центр РАН, 2023  
© ИППЭС КНЦ РАН, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие научного редактора.....	4
Введение.....	5
Глава 1. Физико-географические и климатические характеристики района исследования.....	7
Глава 2. Антропогенная нагрузка района города Мурманска.....	14
Глава 3. Гидрографическая сеть города Мурманска.....	20
Глава 4. Методы исследования озер.....	24
Глава 5. Расположение, общее описание и морфометрические особенности озер города Мурманска.....	36
Глава 6. Химический состав воды озер.....	48
Глава 7. Донные отложения озер.....	77
Глава 8. Гидробиологическая характеристика озер.....	97
Глава 9. Ихтиологическая характеристика озер.....	134
Заключение.....	155
Библиографический список.....	159

## ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Проблема изучения экологии крупных мегаполисов в мировой науке приобретает все большую актуальность. Доказано, что целый ряд климатических и экологических показателей в крупных городах отличается от среднефоновой по региону. Настоящее издание представляет собой аналитическое описание новых значимых результатов комплексных экологических исследований озер в крупнейшем городе Арктической зоны — Мурманске. Выбор объектов продиктован тем обстоятельством, что озерные экосистемы являются в конечном итоге аккумуляторами всех видов загрязнений, которым подвержены урбанизированные территории.

Монография состоит из 9 глав, которые содержат комплекс гидрохимических и гидробиологических научных результатов, а также сопутствующую информацию об исследованных водных объектах, источниках загрязнения и особенностях водосборной территории. Впервые описаны условия формирования качества вод, донных отложений и сообществ гидробионтов, приведена характеристика антропогенной нагрузки, инвентаризированы основные источники загрязнения в г. Мурманске с учетом гидрографической сети. Эта информация позволяет расширить понимание процессов, происходящих в исследованных озерах под влиянием разнотипной антропогенной деятельности. Все методы, которые использовались при изучении озер г. Мурманска, соответствуют общепринятым международным требованиям к лимнологическим исследованиям.

В настоящее издание включен палеолимнологический раздел, содержащий информацию о накоплении загрязняющих веществ в исторической ретроспективе и показывающий динамику накопления конкретных загрязняющих веществ в донных отложениях, включая ряд металлов и нефтяных углеводородов. Доказаны признаки повышения сапробности и трофического статуса озер, что неизбежно и часто наблюдается в водных системах крупных урбанизированных территорий. Ихтиологический раздел включает данные о сообществах рыб, населяющих исследованные озера, что представляет особый интерес для населения, занимающегося любительским рыболовством. Результатом техногенного влияния стало повышение содержания микроэлементов, не выделяя эссенциальные, в органах и тканях рыб, которые всегда необходимы организму для обеспечения биохимических функций. Показаны очень низкие концентрации свинца у рыб, наряду с высокими концентрациями этого элемента зарегистрированными в донных отложениях.

Монография представляет интерес для экологов, палеолимнологов, специалистов в области гидрохимии и гидробиологии, студентов и аспирантов.

## ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация — глобальный необратимый процесс, сопряженный с повышенными экологическими рисками для биоты, в том числе человека. Находясь в условиях постоянной антропогенной нагрузки, городские экосистемы должны обеспечивать свои главные функции, определяющие не только комфорт, но и возможность устойчивого функционирования в стресс-среде, противостоя постоянным воздействиям поражающих факторов. В северных широтах, в том числе в районах, относимым к Арктической зоне и/или к Арктике, природные экосистемы наиболее уязвимы к различного рода антропогенной нагрузке. Климат является серьезным ограничением для самозащиты и восстановления экосистем, особенно в случае постоянного воздействия техногенеза.

Многочисленные пресноводные водоемы Арктической зоны — неотъемлемая ее составляющая, нуждающаяся во всестороннем изучении и охране с учетом постоянного роста антропогенной нагрузки, в том числе в виде развития урбанизированных территорий, а также глобальных климатических изменений, касающихся всей планеты. Среди шести самых крупных городов мира, полностью расположенных за Северным полярным кругом, пять находятся на территории Российской Федерации, в первую очередь в Мурманской области, где, наряду с высоким уровнем урбанизации, отмечается высокая концентрация промышленно развитых территорий, которые преимущественно прилегают к малым и крупным городам региона. А с учетом гидрографических особенностей Мурманской области развитие промышленных зон и урбанизированных территорий неизменно сказывается на ухудшении экологического состояния водной среды региона. Это выражается в изменениях химического состава воды и донных отложений водных объектов, деградации высшей водной растительности, сообществ планктонных, бентосных организмов и ихтиофауны, а также в накоплении загрязняющих веществ, в том числе таких токсичных, как Hg, Cd, Pb, Ni и др., в органах и тканях названных групп живых организмов.

Проект Российского научного фонда «Экологическая оценка и прогноз устойчивого функционирования водных экосистем урбанизированных территорий в Арктической зоне» № 19-77-10007 был задуман и реализован с целью дать оценку современного состояния водной среды данных территорий с применением комплекса биологических, гидрохимических и геохимических методов, а также чтобы разработать рекомендации по ликвидации последствий воздействия антропогенной деятельности на водные объекты и по сохранению этих объектов с учетом продолжающихся изменений в окружающей среде и климате.

Ключевой территорией для его реализации стал Мурманск — самый крупный город, расположенный за Северным полярным кругом, а основными объектами исследования стали 8 озер, находящиеся либо в самом Мурманске, либо вблизи него. Все выбранные водоемы были практически не изученными, особенно если говорить о комплексном подходе к лимнологическим работам. В итоге за четыре года (три года в рамках проекта РНФ и еще один год (сезон), который можно назвать рекогносцировочным) были получены уникальные данные обо всех важнейших компонентах экосистем озер г. Мурманска. Эти сведения теперь на страницах данной монографии. Для удобства чтения и восприятия информации книга разбита на главы согласно тем самым

компонентам — начиная от описания территории и основных морфометрических особенностей озер и заканчивая состоянием ихтиофауны и уровнем накопления загрязняющих веществ (тяжелых металлов) в органах рыб и беспозвоночных. Вместе с тем книга не является финальной точкой изучения выбранных городских водных объектов, исследования будут продолжены, но, возможно, в другом ключе или с другими озерами.

Авторы выражают искреннюю благодарность всем, кто помогал в реализации данного проекта РНФ: аналитикам из Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (Апатиты) — канд. техн. наук И. Р. Елизаровой, канд. геогр. наук Л. П. Кудрявцевой, М. Б. Мальшевой, Д. С. Бернадской; сотрудникам Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск) — канд. физ.-мат. наук С. В. Бурдюху, А. С. Парамонову, В. Л. Утицыной, М. В. Эховой; куратору проектов РНФ от Кольского научного центра РАН канд. биол. наук Е. А. Боровичеву, анонимным рецензентам годовых отчетов проекта РНФ, а также всем тем, кто возил участников полевых работ за пробами, кто помогал отбирать образцы воды и донных отложений, кто давал ценные советы и рекомендации и, конечно, нашим близким и родным людям.

## Глава 1

### ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

*Географическое положение.* Город Мурманск расположен на четырех морских террасах на восточном берегу Кольского залива, в 50 км от выхода в открытое Баренцево море (рис. 1.1). Террасы расположены с юга на север и своими склонами ориентированы на запад. С востока город закрыт грядой сопкок высотой 250–300 м. Площадь территории города составляет 154,4 км<sup>2</sup>. Наибольшая отметка высоты над уровнем моря в районе жилой застройки равна 140 м, наименьшая — 3 м. Максимальная высота в пределах городской черты составляет 253 м над уровнем моря (гора Горелая). Рельеф города довольно сложный и пересеченный, за исключением старой его части (Октябрьский район). В пределах одного жилого квартала дома расположены на разных уровнях (Осауленко, 2012). К северу от Мурманска, в 20 км, располагается город Североморск, а южные микрорайоны непосредственно граничат с городом Кола (Минин, 2014).



Рис. 1.1. Вид на г. Мурманск (фото Хлабыстина Н.)

*Геологическое строение и рельеф.* Город Мурманск расположен в северо-восточной части Балтийского щита, представляющего собой выступ кристаллического фундамента Русской платформы. В геологическом строении территории принимают участие породы архея, протерозоя и четвертичные отложения. Породы архея и протерозоя представлены изверженными и метаморфическими разностями: гранитами, гнейсами, жильными диабазами, габбро и амфиболитами (Атлас..., 1971). Эти породы слагают горы и возвышенности, местами выходят на поверхность (больше всего выходов на восточном берегу), местами перекрыты четвертичными отложениями (Генеральный..., 2015).

Четвертичные отложения представлены ледниковыми, морскими и современными образованиями (Атлас..., 1971). Мощность четвертичных отложений, как правило, невелика и на значительной части территории



не превышает 2 м, у подножий склонов возвышенностей и в понижениях рельефа она увеличивается до 10–20 м. В крупных депрессиях мощность четвертичных отложений возрастает до 50–100 м, в южной части города (Первомайский округ) достигает 160–180 м, из которых 60 м вскрыто в борту карьера.

Ледниковые отложения наиболее широко распространены в левобережной части города и на юго-востоке его правобережной части (к юго-востоку от горы Горелой) и представлены моренными отложениями (основная и конечная морена) и водно-ледниковыми отложениями (флювиогляциальные, озерно-ледниковые, ледниково-морские) (Атлас..., 1971).

Широкое развитие имеют отложения основной морены, ее мощность составляет 2–4 м. Она представлена песчаными и супесчаными (в районе озер Семеновского, Белого и Еловского) грунтами с большим содержанием гравия, гальки, щебня и валунов. Конечная морена слагает узкие гряды, вытянутые с северо-запада на юго-восток (в районе р. Росты). Сложены гряды песчаной мореной со следами некоторой сортировки, с поверхности они перекрыты слоем валунов и глыб (Генеральный..., 2015).

Флювиогляциальные отложения распространены незначительно и представлены дельтами, расположенными в осевых частях депрессий рек Тулома, Большая и Малая Лавна, Кола, а также Кольского залива. По своему составу они близки к отложениям конечных морен, но отличаются от них большей сортировкой материала и меньшими размерами валунов. Вскрытая мощность нижнего горизонта дельт достигает 20–30 м, верхнего — 10–12 м. Озерно-ледниковые и ледниково-морские отложения выполняют днища Кольской и Туломской депрессий и представлены песками и суглинками мощностью 5–15 м, обнажаются в карьерах месторождений, в долинах Фадеева ручья, Варничного ручья и др. Они перекрыты позднеледниковыми морскими отложениями и торфяниками общей мощностью 10–20 м. В целом комплекс морских отложений представлен различными литологическими разностями от илов и глин до грубых песков с галькой и валунами.

Современные отложения представлены аллювиальными, торфяно-болотными и озерными типами осадков. Первые развиты в руслах и поймах рек Большая Лавна и Кола. Наиболее широко аллювиальные отложения развиты в дельте р. Кола. Торфяно-болотные отложения встречаются как на водоразделах, так и в понижениях рельефа и занимают около 30 % всей площади. В среднем их мощность составляет 1–1,5 м, достигая на отдельных участках 6–8 м и более (Атлас..., 1971). Озерные отложения слагают дно современных озер г. Мурманска.

**Климат** г. Мурманска характеризуется как арктически умеренный, для которого свойственна частая смена погоды и ветровой режим муссонного характера. Влияние Атлантики определяет относительную мягкость климата, однако на данной территории наблюдается сложный температурный режим, связанный с резкими перепадами температурных показателей (Светлова, 2011). Так, средняя температура самых холодных месяцев (январь-февраль) составляет –9,7 и –9,2 °С соответственно, а самого теплого (июль) — +13,2 °С (рис. 1.2). Абсолютный максимум температуры воздуха зафиксирован в июле 1972 г., он составил +32,9 °С. В свою очередь, абсолютный минимум (–39,4 °С) пришелся на январь 1985 и 1999 гг. (Разуваев и др., 2022).

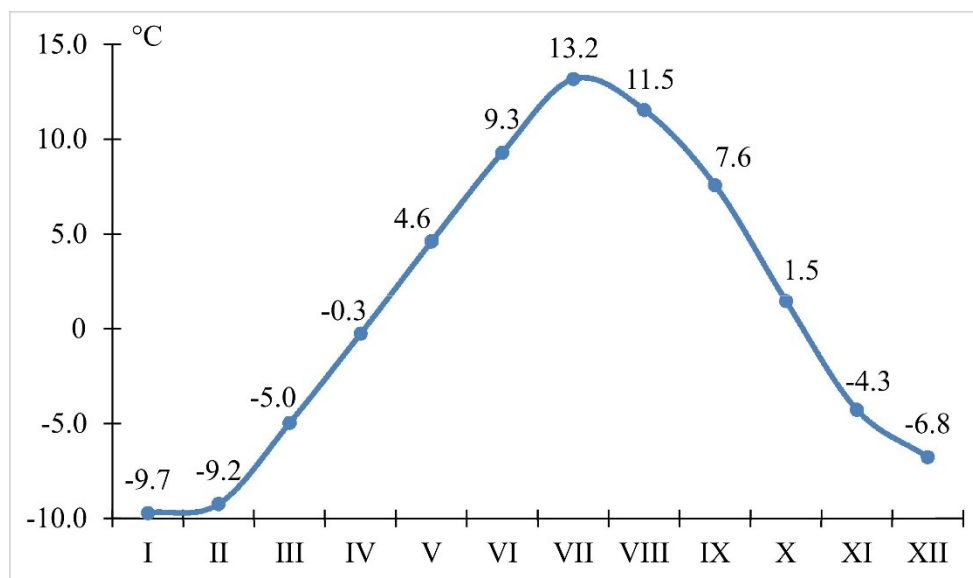


Рис. 1.2. Годовой ход среднемесячной температуры воздуха в г. Мурманске за период 1990–2019 гг. Составлено по (Описание..., 2022)

В температурном режиме г. Мурманска наблюдается тенденция к потеплению, проявляющаяся в изменениях как среднегодовой температуры, так и среднесезонных. Однако температурные изменения в разных сезонах не всегда идут в одной фазе и периоды потепления неоднократно сменялись периодами похолодания. Зимние и весенние температуры имели наибольшие вариации по сравнению с летними (Демин и др., 2015). Среднегодовая температура воздуха  $t_{сг}$  в г. Мурманске для периода 1881–1960 гг. составляла 0 °С, для периода 1961–1990 гг. — также около 0 °С, в то же время для периода 1991–2010 гг. она уже была равна 0,8 °С, а для периода 2004–2013 гг. — +1,5 °С (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Средние сезонные и годовые температуры в г. Мурманске для различных периодов (Демин, 2012; Демин и др., 2015)

Период	Средняя температура, °С				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1881–1960 гг.	-8,0	0,7	10,6	3,2	0,0
1961–1990 гг.	-8,5	1,1	10,9	3,8	0,1
1990–2010 гг.	-7,2	1,7	11,1	4,2	0,8
2004–2013 гг.	-6,8	2,9	11,8	5,2	1,5

Внезапное похолодание в летний период и потепление зимой обуславливается частой сменой направления ветров. Зимой и осенью преобладают южные ветры с материка, летом — северные с Баренцева моря (Яковлев, 1961). В г. Мурманске в течение года преобладает южное направление ветра (43,3 %), на долю же северного ветра приходится 17,6 % (рис. 1.3).

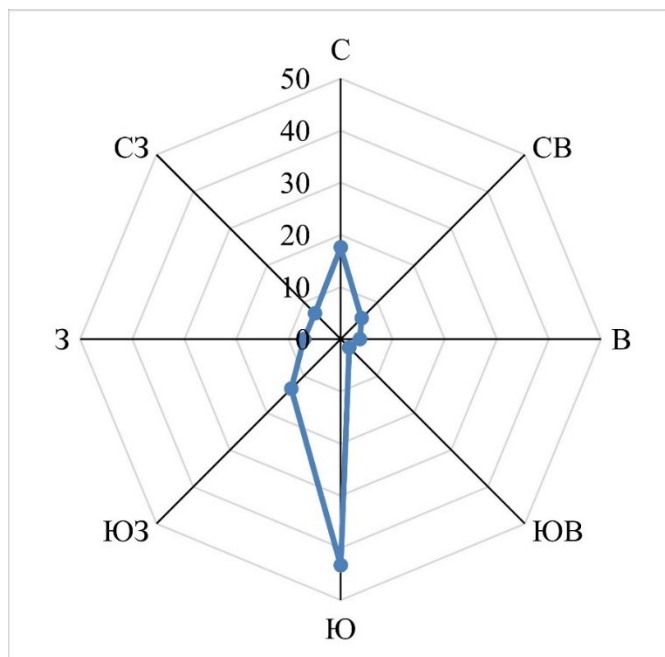


Рис. 1.3. Годовая повторяемость направлений ветра в г. Мурманске, %

Среднегодовая скорость ветра составляет 4,6 м/с. Для августа характерна наименьшая среднемесячная скорость ветра (3,7 м/с), наибольшая же скорость ветра (5,4 м/с) типична для января и февраля (Разуваев и др., 2022), максимальная скорость ветра — 36 м/с (Атлас..., 1971).

Климат г. Мурманска характеризуется как субарктический, на данной территории наблюдается большое количество осадков, воздействие низких температур и, как следствие, замедленные процессы испарения воды. Среднее годовое количество осадков в период с 1936 по 1980 гг. составило 488 мм, а в период с 1981 по 2010 гг. — 493 мм (Демин, 2012). В июле и августе выпадает наибольшая часть осадков (в среднем 68 и 65,9 мм соответственно), наименьшее количество — в феврале (23,1 мм) (рис. 1.4).

Так как в условиях субарктического климата осадки превышают испарение (испаряемость составляет 300 мм в год), здесь отмечается избыток влаги и расположены области с избыточным увлажнением (по Б. П. Алисову). В данных условиях по степени проточности формируются озера проточного типа, в них осуществляется приток и отток воды поверхностными и подземными путями (Алекин, 1970; Никоноров, 2001).

Аккумуляция атмосферных выпадений в снежном покрове происходит в течение длительной зимы, и в короткий период весеннего половодья они стремительно поступают в водосборные бассейны. Средняя многолетняя высота снежного покрова достигает к середине ноября 9 см и постепенно увеличивается к концу марта до 42 см (Яковлев, 1961). Максимальная высота снежного покрова в среднем составляет 60 см (Атлас..., 1971). Во время снеготаяния почва находится в промерзшем состоянии и ее верхний слой в этот период практически водонепроницаем (Даувальтер, 1999).

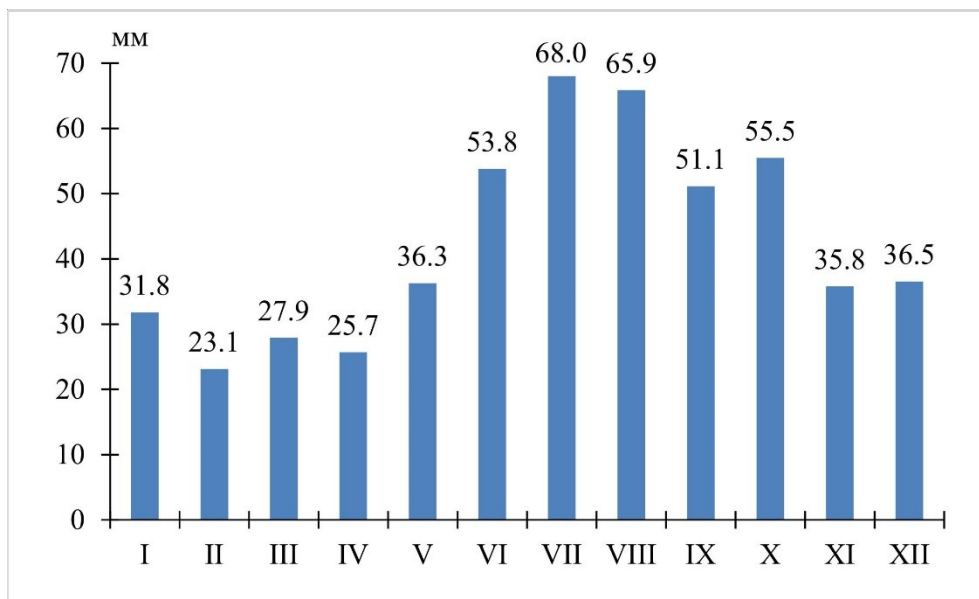


Рис. 1.4. Годовой ход атмосферных осадков в г. Мурманске за период 1990–2019 гг. Составлено по (Булыгина и др., 2022)

Продолжительность светового дня в течение года колеблется от 0 до 24 часов. Годовой ход средней суммарной продолжительности солнечного сияния представлен на рис. 1.5, в период полярной ночи (декабрь-январь) солнце не появляется из-за горизонта, а в июле, во время полярного дня, оно светит в среднем 250 часов.

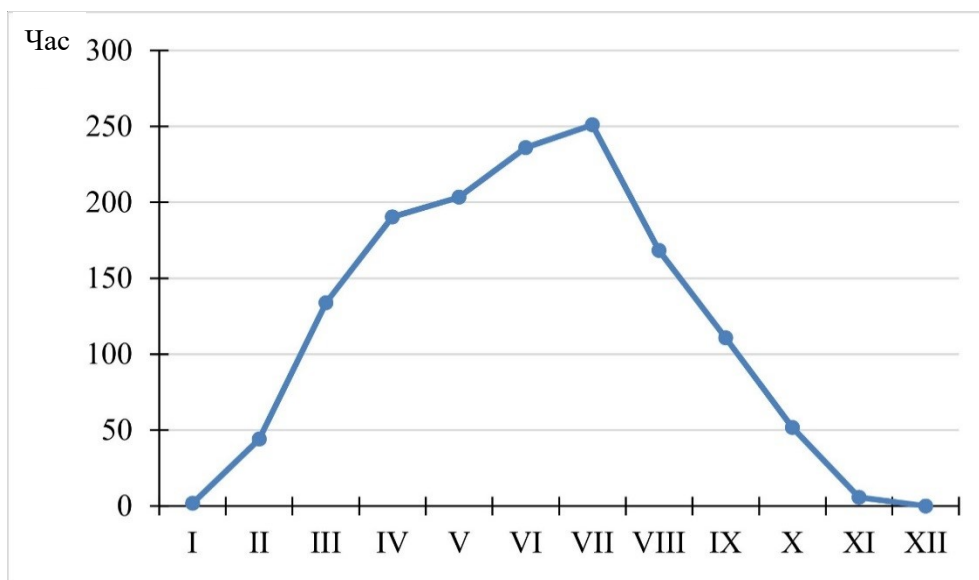


Рис. 1.5. Годовой ход средней суммарной продолжительности солнечного сияния в период с 1990 по 2020 гг.

Среднегодовая продолжительность солнечного сияния в период с 1990 по 2020 гг. составила около 1400 часов (Апасова и др., 2022). В связи с тем, что фактическая продолжительность солнечного сияния зависит от длительности дня и степени закрытости горизонта, в отдельные годы данный показатель может существенно отличаться от средней многолетней (Яковлев, 1961). Суммарная солнечная радиация для г. Мурманска составляет 65 ккал·мес/см<sup>2</sup> (Атлас..., 1971).

**Почвенный покров и растительность.** Город Мурманск находится на границе лесной и тундровой зон, в зоне распространения элювиальных и массивно-кристаллических почвообразующих пород, где многолетнемерзлые породы отсутствуют. В его пределах почвы существенно трансформированы. На песчано-супесчаных щебнистых породах формируются подбуры, на менее щебенистых почвеннообразующих — торфяно-подбуры и глееземы. Мощность почв варьируется от 35 см (породы тяжелого гранулометрического состава) до 1 м (породы легкого гранулометрического состава) (Тарасова, Абакумов, 2016).

По гранулометрическому составу почвы относятся к песчаным и супесчаным. Для легких и щебнистых отложений характерны большая водопроницаемость, наличие нисходящих токов почвенных растворов, свободный внутренний дренаж, господство окислительных процессов и отсутствие оглеения (Смагин, 2003).

Для почв г. Мурманска свойственна средняя насыщенность основаниями, а также низкая буферная и сорбционная способность (почвы сильнощебнистые с повышенным содержанием песка), что приводит к их неустойчивости по отношению к техногенным загрязнениям и отрицательным воздействиям окружающей среды (Агроэкологическая..., 2009; Тарасова, Абакумов, 2016).

В работе (Агроэкологическая..., 2009) авторы относят урбоземы г. Мурманска в основном к средне- и частично сильнокислым, что обусловлено внесением верхового кислого торфа при формировании почвогрунтов. Для урбоземов характерна неоднородность распределения органических веществ (от 8,1 до 40,0 %). На некоторых участках городской территории наблюдается частичное загрязнение тяжелыми металлами (превышение ПДК по Ni, Cu и Zn). Большая часть Cu, Zn и Mn, поступающих на поверхность почвы, закрепляется в верхнем горизонте. Для других элементов схожая тенденция авторами не отмечается.

Как уже было замечено, г. Мурманск находится в лесотундровой зоне (Атлас..., 1971). Среди его жилых зон располагаются участки со слаборазрушенной естественной растительностью. Большое распространение имеют березовые криволесья с кустарничково-зеленомошными сообществами, которые представлены в основном березой Черепанова (*Betula czerepanovii Orlova*) (рис. 1.6). На склонах сопек и в понижении рельефа, среди березовых криволесий, встречаются заболоченные участки (Другова, 2017).

Урбанизированная среда накладывает свои отпечатки на состав растительных сообществ. Так, у подножий склонов рядом с городскими застройками формируется типичная антропогенная луговая растительность: пырей ползучий (*Elytrigia repens*), лютик едкий (*Ranunculus acris* L.), щавель конский (*Rumex confertus* Willd.), манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.) и др. Растительность сопек представлена зарослями

иван-чая (*Chamaenerion angustifolium* L.), купыря (*Anthriscus sylvestris* L.) и крапивы (*Urtica dioica* L.). Среди древесной растительности доминирует ива (*Salix* L.) (Александрова и др., 2020).



Рис. 1.6. Береза Черепанова, Горелая сопка, г. Мурманск  
(фото Орешкина Д.)

Большое влияние на видовое разнообразие растительных сообществ г. Мурманска оказало создание объектов озеленения. Среди древесных насаждений на территории города наиболее распространенными интродуцентами являются рябина Городкова (*Sorbus gorodkovii*) и сирень венгерская (*Syringa josikaea*). Также среди городских насаждений представлены: шиповник морщинистый (*Rosa rugosa*), спирея средняя (*Spiraea media*), кизильник черноплодный (*Cotoneaster melanocarpus*), боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea*), карагана древовидная (*Caragana arborescens*) и др. Хвойные растения встречаются реже всего и представлены одним видом — лиственницей сибирской (*Larix sibirica*) (Гонтарь и др., 2016).

## Глава 2 АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА РАЙОНА ГОРОДА МУРМАНСКА

Согласно данным, представленным в ежегодных докладах Минприроды «О состоянии окружающей среды Мурманской области», к основными источниками загрязнения атмосферного воздуха г. Мурманска являются предприятия теплоэнергетики, работающие на мазутном топливе, и автомобильный транспорт. В связи с климатическими особенностями для северных городов России характерны длительные отопительные сезоны и преобладание угля или мазута в топливном балансе, что сказывается на общем объеме выбросов (до 90 %) от стационарных источников, сжигающих органическое топливо (Битюкова и др., 2011).

Распределение выбросов от теплоэнергетических станций в пространстве и их воздействие на состояние окружающей среды зависит от ряда факторов, к ключевым из которых следует отнести: химический состав сжигаемого топлива; высоту дымовых труб, через которые отходящие газы поступают в атмосферный воздух; климатические и метеорологические условия (Пространственное..., 2018).

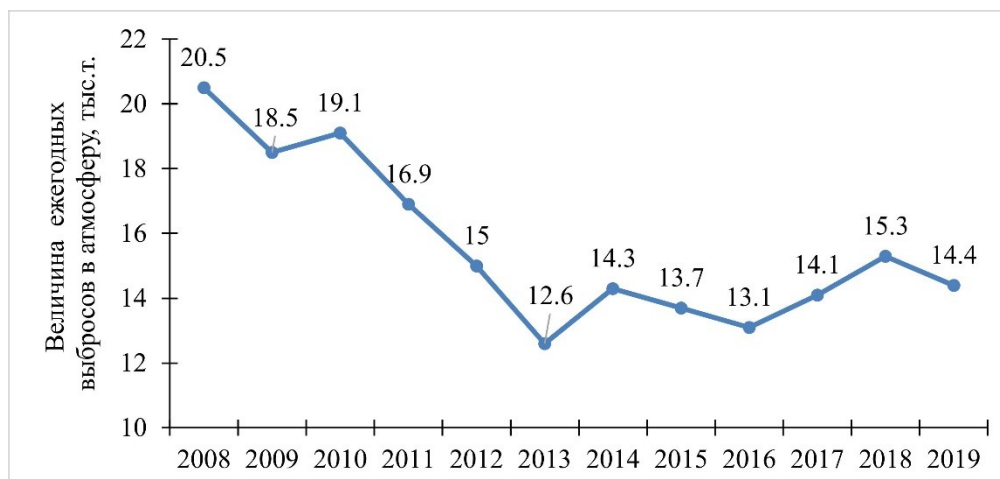


Рис. 2.1. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу ОАО «Мурманская ТЭЦ» за период 2008–2019 гг.

На территории г. Мурманска располагаются следующие предприятия теплоэнергетики: ОАО «Мурманская ТЭЦ» (включая котельные «Южная» и «Восточная»), ГОУТП «ТЭКОС», ОАО «Мурманский морской рыбный порт». Все вышеперечисленные объекты в качестве топлива используют мазут марки М-100, при этом дымовые трубы пяти основных котельных имеют существенную высоту и рассеивание мазутной золы происходит на большие расстояния. Мурманск фактически полностью покрывается зонами воздействия мазутных котельных, однако системами пылегазоочистки ни одна котельная не оборудована (Малкина, 2015). Мурманская ТЭЦ была введена в эксплуатацию в 1934 г. и использовала уголь в качестве основного источника топлива до 1964 г. В 1960-е начался постепенный перевод Мурманской ТЭЦ на новый вид топлива — мазут

(Геоэкология..., 2020). Согласно докладом Министерства природных ресурсов и экологии «О состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области» за период 2008–2019 гг., наблюдается снижение выбросов загрязняющих веществ от Мурманской ТЭЦ в атмосферный воздух на 6,137 тыс. т (рис. 2.1). Однако количество данных выбросов изменялось неравномерно: наименьший объем — 12,6 тыс. т/год — был зафиксирован в 2013 г.; в 2019 г., по сравнению с 2013-м, он увеличился на 14,21 %.

Анализ качественного и количественного состава выбросов Мурманской ТЭЦ показал, что в их структуре преобладают газообразные и жидкие вещества, при этом наибольшая доля приходится на диоксид серы и оксиды азота (табл. 2.1). В период с 2012 по 2015 гг. наблюдается постепенное снижение выбросов оксида углерода — на 14,989 т/год. Количество твердых выбросов увеличилось на 16,246 т/год. Следует отметить, что объем выбрасываемых в атмосферу города летучих органических соединений резко вырос с 3,89 до 10,68 т/год, к настоящему моменту остается на прежнем уровне.

Таблица 2.1

Объем выбросов Мурманской ТЭЦ в атмосферу значимых видов загрязняющих веществ за 2012–2015 гг., т/год

Тип выбросов	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Твердые	70,414	83,586	82,34	86,66
Газообразные и жидкие	14 901,68	12 518,91	14 290,25	13 603,83
в том числе				
оксиды азота (в пересчете на NO <sub>2</sub> )	1 648,84	1 626,75	1 823,8	1 682,57
оксид углерода	64,779	61,86	58,48	49,79
диоксид серы	13 184,15	10 819,59	12 397,22	11 860,76
углеводороды (без летучих органических соединений)	–	–	–	–
летучие органические соединения	3,89	10,68	10,68	10,68
прочие газообразные и жидкие	0,014	0,04	0,06	0,03
Всего	14 972,09	12 602,49	14 372,59	13 690,48

*Примечание.* По данным отчетов об устойчивом развитии генерирующих компаний Группы «Газпром энергохолдинг» за 2012–2015 гг.

В структуру предприятия ГОУТП «ТЭККОС» входят котельные «Северная» и «Роста». Удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии от этих котельных значительно отличается и составляет: «Роста» — 181,9 кг у. т. /Гкал, «Северная» — 166,2 кг у. т. /Гкал. Общий объем выбросов от предприятия в период с 2008 по 2012 гг. вырос на 1,081 тыс. т, составив в 2012 г. 10,127 тыс. т (Схема..., 2016), что на 32 % меньше количества выбрасываемого объема загрязняющих веществ по сравнению с объемами от «Мурманской ТЭЦ» в 2012 г.

Еще одним поставщиком вредных загрязняющих веществ в атмосферу является завод по термической обработке бытовых отходов (ОАО «Завод ТО ТБО»), работающий с 1986 г. в северном районе города. В качестве основного



вида топлива используются твердые бытовые отходы. В зависимости от технологии и состава сжигаемых отходов в атмосферный воздух совместно с дымовыми газами поступают следующие загрязняющие вещества: твердые взвешенные вещества (зольный остаток или шлак), кислоты и газообразные вещества (HCl, HF, HBr, HI, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, и др.), тяжелые металлы (Pb, Cu, Cd, Cr, Ni, V, Hg, As, Sb, Se, Zn, Fe, Co, Cr и др.) и углеродные соединения (полихлорированные дибензодиоксины (PCDDs), хлорбензолы (CBs), полихлорированные дибензофураны (PCDFs), полициклические ароматические углеводороды (ПАНs), летучие органические соединения (VOCs)) (Quina et al., 2011; Temporal..., 2012). Радиус негативного воздействия деятельности мусоросжигательного завода на состояние атмосферного воздуха — от 500 м до 1 км.

Помимо ТБО, дополнительным топливом для стабилизации горения и растопки котлов служит топочный мазут марки М 100. Годовой расход мазута\* составляет 4644 т/год. Согласно ежегодным экологическим отчетам Мурманской обл., в атмосферу города предприятием было выброшено в 1997 г. — 0,524, 1998 г. — 0,337, 1999 г. — 0,391, 2000 г. — 0,504 тыс. т/год загрязняющих веществ (Доклад о состоянии..., 1997–2000). Анализ выбросов загрязняющих веществ ОАО «Завод ТО ТБО» от котлоагрегата № 1, проводимый лабораторией Специализированной инспекции государственного экологического контроля и анализа Росгидромета, показал, что максимально разовые выбросы загрязняющих веществ превышают предельно допустимые выбросы (ПДВ), а фактическая эффективность электрофильтров ниже паспортной. В табл. 2.2 представлены данные об изменении количества выбросов в атмосферный воздух г. Мурманска после реконструкции электрофильтра (Мартемьянова, 2005).

Таблица 2.2

Изменение количества выбросов в атмосферный воздух, мг/с,  
г. Мурманска после реконструкции электрофильтра на ОАО «Завод ТО ТБО»

Количество выбросов за период	Взвешенные вещества	Cu	Ni	Zn	Pb	Fe	Co	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
До реконструкции	39 430	24	0,4	54,8	48	450	0,56	4,4
После реконструкции	600	1	0,01	1,8	1	10	0,01	0,1

Следует отметить, что в 2017 г. в экологическом отчете предприятие отразило недостоверную информацию о фактическом выбросе загрязняющих веществ в атмосферный воздух, нарушив тем самым Закон «Об охране окружающей среды»\*\*. В 2018 г. завод проводил меры по регулированию выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух в период неблагоприятных метеорологических условий.

\* См.: Об утверждении программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования город Мурманск на 2014–2025 годы: решение Совета депутатов г. Мурманска от 23 июня 2014 г. № 75-1093. URL: <http://docs.cntd.ru/document/432826768> (дата обращения: 11.11.2020).

\*\* См.: Об охране окружающей среды: федер. закон от 10 января 2002 года № 7-ФЗ // Официальный интернет-портал информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102074303>.

В целом уровень загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы г. Мурманска оценивается как низкий, однако в периоды 2005–2008 и 2011–2013 гг. (рис. 2.2) наблюдалась тенденция загрязнения атмосферного воздуха формальдегидами (среднегодовые концентрации превышают 1 ПДК) (Доклад..., 2002–2013). Наибольшая среднегодовая концентрация — 1,8 ПДК отмечалась в 2011 г. Увеличение концентрации формальдегидов в основном характерно для теплого времени года (Доклад..., 2011).

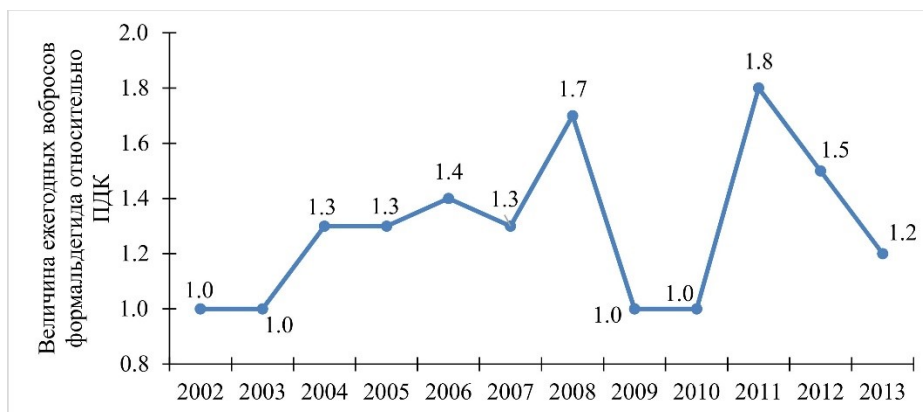


Рис. 2.2. Динамика концентраций формальдегида в атмосфере г. Мурманска за 2002–2013 гг.

Данное явление объясняется тем, что формальдегид относится к классу фотооксидантов, образующихся в воздухе под влиянием солнечной радиации при фотоокислении разнообразных органических соединений, таких как метан, пропилен, бензин и другие углеводороды (Селегей, 2005; Кокош, Какарека, 2019). К преобладающим источникам поступления формальдегида в атмосферу города относятся установки сжигания топлива: теплоэлектростанции, котельные, мусоросжигатели, двигатели внутреннего сгорания (Скубневская, Дульцева, 1994).

Стоит отметить, что в период с 1997 по 2020 гг. в атмосфере г. Мурманска наблюдались случаи, когда среднемесячные концентрации превышали санитарную норму по следующим веществам: оксид азота (2015 г. — 2 ПДК, 2016 г. — 1,6 ПДК); диоксид азота (2006 г. — 1 ПДК, 2007 г. — 2 ПДК); оксид углерода (2014 г. — 2 ПДК, 2015 г. — 1,6 ПДК, 2016 г. — 1,2 ПДК); фенолы (2016 г. — 1,2 ПДК); бенз(а)пирены (2014 г. — 2 ПДК, 2017 г. — 1,4 ПДК, 2018 г. — 2,4 ПДК, 2020 г. — 3,2 ПДК). Увеличение концентраций вышеперечисленных загрязнителей происходит чаще всего в холодное время года, в периоды антициклоидального типа погоды со слабыми ветрами переменных направлений, инверсиями, штилями, способствующими накоплению загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города (Доклад..., 1997–2019).

Химический состав атмосферных осадков является индикатором состояния атмосферы и отражает информацию о поступлении загрязняющих веществ в городскую среду (Распределение..., 2014).

Основными компонентами анионного состава атмосферных осадков на глубокоурбанизированных территориях являются гидрокарбонаты и сульфаты, что указывает на значительное загрязнение атмосферного воздуха диоксидом серы и запыленность карбонатно-сульфатными аэрозолями.

По данным П. Ф. Свистова и А. С. Талаш (2015), для г. Мурманска характерно следующее распределение ионного состава атмосферных осадков: содержание сульфатов и хлоридов (техногенной и морской составляющей) примерно одинаковое, далее следуют гидрокарбонаты и кальций (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Состав атмосферных осадков г. Мурманска (Свистов, Талаш, 2015)

Параметры, мг/л									$\Sigma_{\text{ион}}$	pH	pH <sub>min</sub>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>			
12,0	14,2	0,4	3,0	0,2	2,2	1,6	8,4	0,6	42,6	6,2	4,6

Согласно обзору «Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2011–2015 гг.» (2016), наибольшее содержание ионов кальция (15,1 мг/л), сульфатов (13,65 мг/л), натрия (4,91 мг/л), гидрокарбонатов (4,17 мг/л) и магния (0,98 мг/л) в атмосферных осадках города отмечалось в 2013 г. Максимальная концентрация хлоридов за отчетный период — 14,18 мг/л была зарегистрирована в 2014 г. (рис. 2.3).

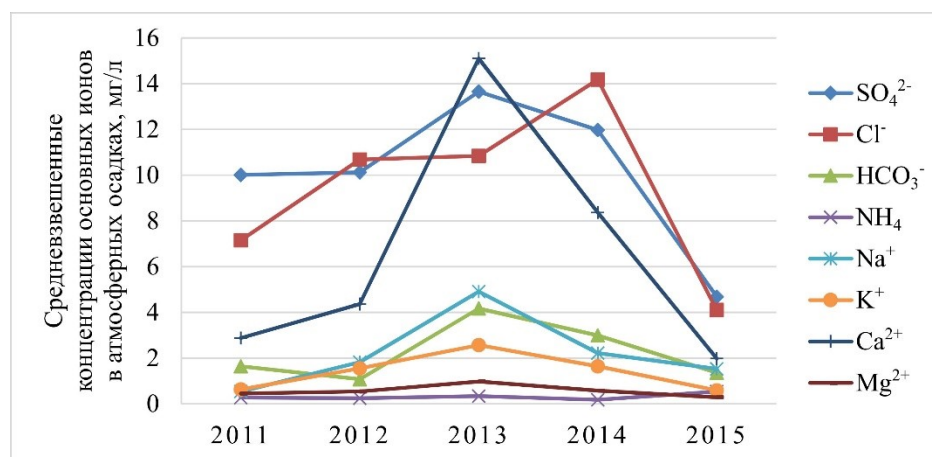


Рис. 2.3. Динамика средневзвешенных концентраций основных ионов в атмосферных осадках г. Мурманска с 2011 по 2015 гг. (Ежегодные..., 2015)

Как уже было отмечено ранее, к одному из источников загрязнения атмосферного воздуха г. Мурманска относится автомобильный транспорт, в результате деятельности которого в окружающую среду поступают оксиды углерода и азота, диоксид серы, формальдегид, бенз(а)пирен, а также ряд тяжелых металлов (Pb, Cu, Zn, V, Ni, Cr, Cd и др.).

К еще одному фактору, оказывающему влияние на состояние окружающей среды г. Мурманска, относятся загрязненные сточные воды местных предприятий. Так, р. Роста подвергается воздействию сточных вод ОАО «Завод ТО ТБО», ПАО «Мурманская ТЭЦ», ОАО «Мурманоблгаз» и ряда других предприятий (Доклад..., 2010). Кроме того, часть неочищенных хозяйственно-бытовых сточных вод микрорайона Роста сбрасывается в одноименную реку (Генеральный..., 2015). В свою очередь, руч. Варничный, протекая через центральную часть

г. Мурманска, собирает по пути стоки с дорог, строительных площадок, а также сточные воды Мурманской ТЭЦ (Доклад..., 2010).

Стоки предприятий г. Мурманска «обогащены» железом, марганцем, цинком, никелем, хромом, ванадием, ртутью, нефтепродуктами и другими загрязняющими веществами. Например, было отмечено, что сточные воды ОАО «Завод ТО ТБО» не соответствуют нормативам ПДК для сбросов в систему хозяйственно-бытовой канализации (ПДК<sub>хбк</sub>) по содержанию хрома и нефтепродуктов (превышение в 234 раза). В совместном стоке мусоросжигательного завода и Восточной котельной наиболее высокие коэффициенты концентраций компонентов в воде относительно ПДК<sub>рбх</sub> отмечаются по следующим элементам: As (1,8), Hg (8), Cr<sup>+6</sup> (27), Zn (9), Cu (429), Ni (48) (Мелентьев и др., 2009). В результате этого в р. Роста и руч. Варничный ежегодно отмечают превышение ПДК органических веществ (ХПК и БПК<sub>5</sub>), азота аммонийного, железа, меди, никеля, марганца, ртути, алюминия, фенолов, нефтепродуктов, а также превышение по интенсивности запаха (Доклад..., 1997–2020).

### Глава 3 ГИДРОГРАФИЧЕСКАЯ СЕТЬ ГОРОДА МУРМАНСКА

Водные объекты Мурманской обл. принадлежат к бассейнам Баренцева и Белого морей. Для области характерна хорошо развитая гидрографическая сеть, в которой значительная роль принадлежит малым рекам (рис. 3.1). Водотоки длиной менее 10 км составляют 95 % общей сети Мурманской обл., их общая протяженность — 63 % суммарной длины всех рек региона.

К наиболее протяженным относятся реки Поной (426 км), Варзуга (254 км), Стрельна (213 км) и Йоканьга (203 км). Суммарная протяженность рек превышает 60 тыс. км, густота речной сети составляет 0,46 км/км<sup>2</sup> (Доклад о состоянии..., 2020).

В Мурманской обл. насчитывается свыше 100 тыс. озер, относительно равномерно распределенных по всему району. Общая озерность (соотношение площади всех озер к площади региона) области составляет 6 %. Основное количество озер (99 %) относится к малым с площадью зеркала, не превышающей 1 км<sup>2</sup>. Общая же площадь всех озер Мурманской обл. составляет 8195 км<sup>2</sup>.

В состав гидрографической сети г. Мурманска входит р. Роста и более 20 ручьев (Фадеев, Варничный, Глубокий и др.) (табл. 3.1), а также озера (Большое, Семеновское, Ледовое, Среднее, Окуновое и др.). Все эти водные объекты принадлежат к бассейну Баренцева моря, а все водотоки впадают в Кольский залив. На рис. 3.2 представлена схема водного бассейна на правобережье Кольского залива.

Река Роста вытекает из оз. Большое, протекает по северной части города в северо-западном направлении и впадает в Кольский залив. Длина водотока равна 12 км, средний уклон реки — 9,9 м/км. К водосборному бассейну р. Роста относятся озера Большое и Рогозеро. Площадь водосбора всей системы оз. Рогозеро — оз. Большое — р. Роста составляет 52,5 км<sup>2</sup>. Несмотря на то, что расстояние между озерами Большое и Рогозеро 1,5 км, их высота относительно друг друга значительно различается.

Рогозеро расположено на 60 м выше, чем оз. Большое. Данные озера соединены между собой руч. Ивановским, длина которого около 2,6 км, уклон водотока — 0,023 м/км, в него впадают воды руч. Правого.

Система водосбора оз. Большое включает в себя руч. Ивановский с притоками, ручьи Овальный, Новый, Лесной, Боковой и оз. Питьевое (Малое). В зимнее время вышеперечисленные ручьи, находясь под снежным покровом, не замерзают (Курганов, 2016).

Истоком руч. Варничного является оз. Карьерное (затопленный карьер, в котором ранее добывали гнейсовые породы), располагающееся у восточного склона горы Горелой. Ручей протекает через оз. Ледовое и течет в северном направлении по территории г. Мурманска. Далее водоток меняет направление на западное и впадает в Кольский залив между мысами Халдеев на юге и Варничный — на севере. Протяженность руч. Варничного — 5,5 км, средний уклон — 13,6 м/км. Общая площадь водосбора составляет 13,7 км<sup>2</sup>.

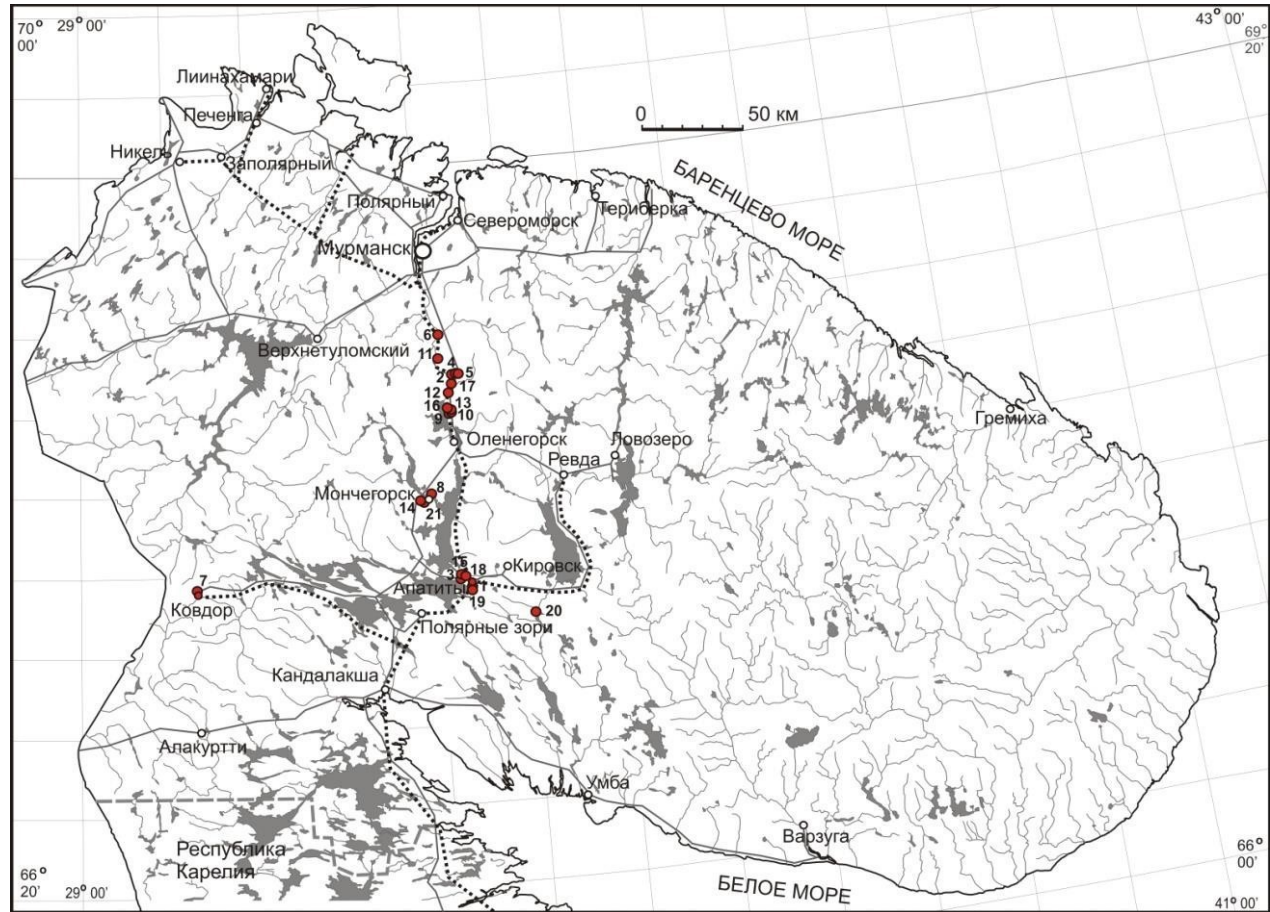


Рис. 3.1. Схема гидрографической сети Мурманской обл. (Евзеров, 2018)  
 (пунктиром показаны железные дороги; сплошной линией — основные шоссейные дороги)

Таблица 3.1

Основные гидрографические характеристики водотоков г. Мурманска

Критерий	Река Роста	Ручей		
		Варничный	Фадеев	Глубокий
Длина водотока, км	8,2/12	5,5	7,5	3,2
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	17/52,5	13,7	14,4	6,10
Средний уклон водотока, м/км	7,3/9,9	13,6	26,5	37,5
Средняя высота водосбора, м	140/110	60	100	120
Общая озерность, %	2/9	2	4	<1
Урбанизированность, %	50/17	65	30	60

*Примечание.* Приведены и указаны через косую черту все имеющиеся в первоисточнике гидрографические данные по р. Роста. Составлено по (Мелентьев и др., 2009).

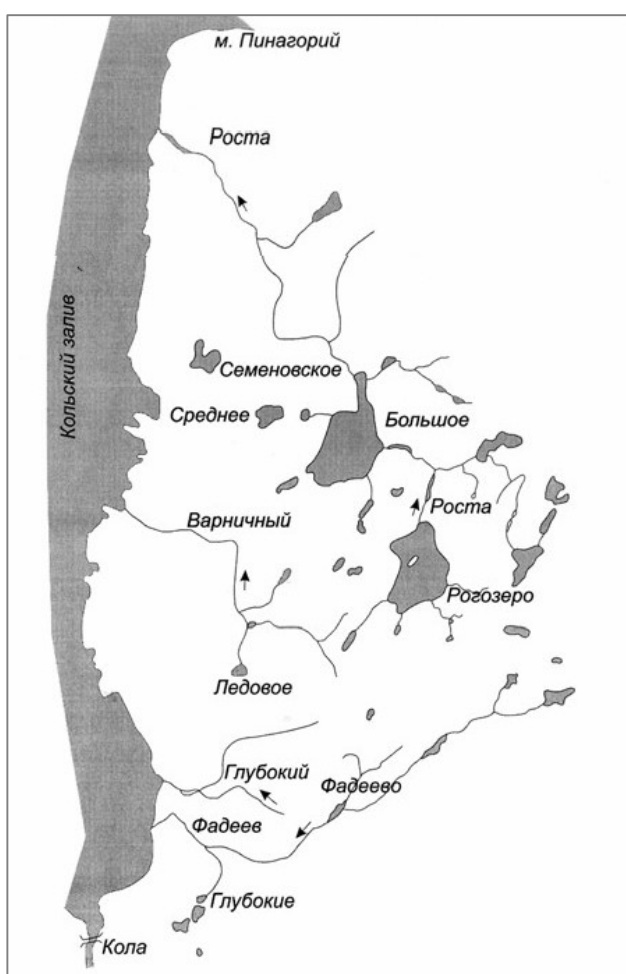


Рис. 3.2. Схема водного бассейна на правом берегу Кольского залива (Методика..., 2009)

Фадеев ручей берет свое начало в оз. Верхнем Фадеевском, протекает через озера Среднее Фадеевское и Нижнее Фадеевское и через 1,5 км пересекает

Восточную объездную автодорогу. До пересечения с автодорогой ручей течет по лесной местности в юго-западном направлении и не подвергается влиянию антропогенной нагрузки. Протекая же по урбанизированной территории, ручей меняет свое направление на западное, принимая на своем пути воды левобережного безымянного водотока, берущего начало из оз. Глубокого. Длина Фадеева ручья составляет 7,5 км, площадь водосбора — 14,4 км<sup>2</sup>, средний уклон водотока равен 26,5 м/км.

В южной части г. Мурманска в западном направлении на протяжении 3,2 км протекает руч. Глубокий. Площадь водосборного бассейна составляет 6,10 км<sup>2</sup>, средний уклон — 37,5 м/км. Устьем ручья является оз. Чистое, из которого вытекает руч. Чистый и впадает в Кольский залив.

Вне черты города в вершину Кольского залива впадают такие крупные реки, как Тулома и Кола.

Описания всех морфометрических особенностей озер г. Мурманска будут приведены в главе 5.



## Глава 4 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЕР

**Полевые исследования.** Полевые работы проводились в 2018–2021 гг. В июле 2018 г. и апреле 2019 г. были проведены рекогносцировочные исследования вне проекта и финансирования РФ. Уже с лета 2019 г. экспедиции проводились в рамках проекта РФ. Основными задачами полевых работ были: визуальный осмотр выбранных водных объектов, анализ глубин озер, измерение портативными приборами некоторых физико-химических параметров воды и донных отложений; отбор проб для дальнейшего изучения. При проведении большинства полевых и аналитических исследований руководствовались «Методами экологических исследований водоемов Арктики» (2019) — монографией, созданной коллективом ученых ИППЭС КНЦ РАН, и «Методами исследования донных отложений озер Карелии» (2020) — авторы Т. С. Шелехова, З. И. Слукровский и Н. Б. Лаврова. С каждого городского озера пробы воды отбирались ежегодно в июле, а с оз. Семеновского — ежеквартально, так как это озеро было выбрано в качестве основного мониторингового объекта.

В период открытой воды полевые исследования на озерах проводились при помощи надувных лодок, передвижение на которых осуществлялось с использованием весел или мотора (рис. 4.1). Зимой работы велись со льда водных объектов, а для создания проруби (майны) использовали ручной ледобур и пилу для льда. В 2018 и 2019 гг. на всех озерах, кроме оз. Большого, были проведены батиметрические исследования при помощи эхолота-картплоттера Garmin Echomap Plus 42cv. В дальнейшем с использованием программы Golden Software Surfer 13 были построены карты глубин всех водных объектов (приведены в главе 5).

Пробы воды обычно отбирали двухлитровым пластиковым батометром, который позволяет брать образцы воды с разных глубин, в полиэтиленовые бутылки объемом 1 л. Для исследования химического состава воды пробы отбирались обычно с поверхностного (1 м от поверхности) и придонного (1 м от дна) слоев. В некоторых случаях пробы воды для оценки химического состава отбирались прямо в бутылку с поверхностного слоя. Для определения содержания нефтяных углеводородов пробы воды также отбирали при помощи батометра, а затем переливали в бутылки из темного стекла объемом 1 л. Пробы фиксировали добавлением четыреххлористого углерода и разбавленной серной кислоты и при температуре +5 °С транспортировали с остальными отобранными пробами в сумке-холодильнике в лабораторию.

Отбор и анализ проб планктона был осуществлен стандартными, общепринятыми в гидробиологической практике методами, адаптированными к условиям Арктики, по схеме, принятой в ИППЭС КНЦ РАН (Методы..., 2019). Основная часть проб для анализа была отобрана из фотического слоя в интервале 0–5 м с помощью батометра с последующим процеживанием через планктонную сеть с размером ячеек 29 мкм (рис. 4.2), которая (сеть) была использована и для получения качественных проб. Ежегодная съемка (2018–2020 гг.) проводилась во второй половине июля, в период интенсивного развития планктонных сообществ. В 2018 г. были исследованы планктонные сообщества с озер Среднее, Южное, Окуневое, Северное, Семеновское и Ледовое, в 2019 г. были отобраны пробы из оз. Треугольного, в 2020 г. — из оз. Рогозеро.

Для изучения сезонных изменений в сообществах планктона было выбрано оз. Семеновское, где отбор проб проводился раз в квартал. Биологический материал фиксировали в растворе Люголя, в некоторых случаях были изучены нефиксированные образцы — с целью таксономического определения деформирующихся от фиксата представителей фитопланктона. В расчетах использовали средние для каждого водоема значения количественных показателей зоопланктона.



Рис. 4.1. Летние работы на оз. Семеновском (июль 2020 г.). Слева направо: А. А. Черепанов, М. А. Постевая и З. И. Слуковский (фото Вальковой С. А.)



Рис. 4.2. За отбором проб воды оз. Среднего А. А. Черепанов — для исследования планктона (фото Слуковского З. И.)

Отбор донных отложений озер для исследования химического состава осадков проводился при помощи дночерпателя Экмана — Берджа (площадь захвата грунта —  $1/34 \text{ м}^2$ ), ковша Ван-Вина, пробоотборника гравитационного типа системы Стогхейма и проотборника гравитационного типа Limpus. Последние два прибора позволяют получать стратифицированные ненарушенные колонки донных отложений, которые можно разделять на слои от 1 см в зависимости от вида дальнейших работ. Для получения детального валового содержания редких элементов, включая тяжелые металлы, в донных отложениях озер г. Мурманска колонки делились на слои по 1 см. Для анализа главных элементов, нефтяных углеводородов и форм нахождения тяжелых металлов колонки делились на слои 5–10 см. В ходе отбора пробы помещались в пластиковые контейнеры или пакеты с замком и транспортировались в лабораторию в сумке-холодильнике с хладоэлементами.

Отбор пробы снега с частицами промышленной пыли проводился в апреле 2019 г. на ледовом покрове оз. Среднего. Проба была взята методом конверта в пластиковый контейнер объемом  $1 \text{ дм}^3$ . Для исследования брался самый верхний слой, имеющий серый оттенок из-за присутствия различных техногенных частиц. После таяния снега вода фильтровалась на фильтр, осадок высушивался и просеивался через сито (размер ячейки  $0,1 \text{ мм}$ ).

Пробы зообентоса отбирали в летний период в центральной и литоральной зоне озер г. Мурманска (рис. 4.3). Литоральная зона исследованных водоемов, в значительной степени антропогенно трансформирована, за исключением оз. Окуневого. На мелководье преобладали каменисто-песчаные субстраты, часто заиленные, покрытые детритом и растительными остатками. В более глубоководной центральной зоне грунты во всех водоемах были представлены илами. Отбор проб донной фауны в глубоководной зоне осуществляли дночерпателем Экмана — Берджа. Количественные и качественные сборы из мелководных участков (на глубине менее 1 м) производили с помощью гидробиологического сачка, снабженного рамой  $30 \times 30 \text{ см}$ . В каждой зоне ежегодно отобрали от 3 до 5 образцов (табл. 4.1). Фиксация зообентосных проб проводилась спиртом.



Рис. 4.3. За отбором зообентосных проб на оз. Северном С. А. Валькова, лето 2020 г. (фото Слукковского З. И.)

Таблица 4.1

Объем отобранных проб зообентоса и некоторые характеристики  
исследованных водоемов г. Мурманска

Озеро	Зона	Количество проб, 2018–2020 г.	Глубина отбора проб, м	Тип грунта
Окуновое	Центр	6	4	Коричневый ил
	Литораль	5	0,5	Каменисто-песчаный
Семеновское	Центр	8	5–10	Коричневый ил
	Литораль	6	0,5	Каменисто-песчаный
Северное	Центр	6	3,5	Черный ил
	Литораль	5	0,5	Каменисто-песчаный
Южное	Центр	6	9	Черный ил
	Литораль	5	0,5	Каменисто-песчаный
Ледовое	Центр	6	5	Черный ил
	Литораль	4	0,5	Каменисто-песчаный
Среднее	Центр	8	15–20	Черный ил
	Литораль	5	0,5	Каменисто-песчаный

Образцы для микробиологических исследований отбирали асептически в стерильную стеклянную тару. Образцы брали в трех повторностях: для неглубоких озер (до 5 м) — из поверхностного слоя воды; для более глубоких озер — из поверхностного и придонного слоев. Также во всех исследуемых озерах в трех повторностях отбирали и образцы донных отложений.

Исследуемые показатели эколого-микробиологического состояния городских водоемов:

- общая численность микроорганизмов и их биомасса в воде и донных отложениях изучаемых водоемов, являющаяся показателем их актуальной или потенциальной активности;
- сапротрофные (органотрофные) бактерии, разлагающие органические соединения в аэробных условиях;
- олиготрофные бактерии, способные жить в среде с низкой концентрацией органического вещества (от менее 1 до 50 мг/л) и участвующие в процессах его минерализации;
- бактерии группы кишечной палочки и кишечная патогенная флора.

Ихтиологические исследования проводились в сентябре-октябре 2020–2021 гг. на следующих озерах г. Мурманска: Большое, Семеновское, Среднее, Окуновое, Ледовое и Северное. Рыбу отлавливали стандартными наборами ставных жаберных сетей из монофиламента. В литоральной зоне (на глубине 1,5–3,0 м) устанавливались сети длиной 25 м, высотой 1,5 м и размером ячеи 10, 12, 16, 18, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 мм, что обеспечивало вылов рыбы длиной  $\geq 5$  см. Сети

устанавливались порядками по 1–2 шт., перпендикулярно берегу, в местах с песчано-гравийными отмелями и крупными валунными отложениями. В профундальной зоне с глубинами более 18 м использовалось до 10 и более сетей с различной комбинацией указанных ячей в один ряд. В пелагической зоне водоема для отбора ихтиологического материала применялись мультиразмерные сети Nordic высотой 3 м и длиной 30 м, состоящие из отдельных секций по 2,5 м с размерами ячей 5, 6,25, 8, 10, 12,5, 15,5, 19,5, 24, 29, 35, 43, 55 мм (Методы..., 2019). Подробная информация об объеме материала, времени лова рыб и составе уловов представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Характеристики использованного ихтиологического материала  
(в скобках указано число рыб, у которых исследовалось содержимое желудков)

Места лова рыб (озера)	Период исследований	Видовой состав рыб в сетных уловах	Число исследованных рыб, экз.
Большое	Сентябрь 2020	Кумжа <i>Salmo trutta</i> Linnaeus, 1758	21 (9)
	Октябрь 2021	Европейская ряпушка <i>Coregonus albula</i> (Linnaeus, 1758)	3 (0)
Семеновское	Сентябрь 2020	Щука <i>Esox lucius</i> Linnaeus, 1758	11 (11)
		Речной окунь <i>Perca fluviatilis</i> Linnaeus, 1758	13 (5)
Окуневое	Сентябрь 2020	Речной окунь	11 (3)
Среднее	Сентябрь 2020, Октябрь 2021	Речной окунь	2 (2)
Ледовое	Сентябрь 2020	Речной окунь	–
Северное	Октябрь 2021	Речной окунь	1 (1)

**Лабораторные исследования.** Аналитические исследования проводились преимущественно в Институте проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (г. Апатиты) и Институте геологии Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск). Химический состав воды определяли согласно методикам (Standard method..., 1999; Моисеенко и др., 2002).

В пробах воды были определены: рН (20 °С) — рН-метром фирмы Metrohm®; электропроводность (20 °С) — кондуктомером фирмы Metrohm®; щелочность — методом титрования Грана; концентрации Na и K — пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией (модель Perkin-Elmer 460, воздушно-ацетиленовое пламя); концентрации Ca и Mg — пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией (модель Perkin-Elmer 460, пламя закись азота — ацетилен); содержание органического материала — методом окисления Mn; концентрации форм Si, N и P — колориметрическим методом; концентрации SO<sub>4</sub><sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup> — жидкостным хроматографом Millipore® (модель Waters 430); концентрации микроэлементов — масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific) и приборе

ELAN 9000. Результаты химического анализа воды с каждой станции усреднялись, и в дальнейшем интерпретация результатов проводилась с учетом усредненных данных. Для контроля качества измерений pH, щелочности, концентраций хлоридов, сульфатов, щелочных и щелочноземельных металлов использовали специализированный компьютерный пакет ALPEFORM, включающий оценку баланса ионов, а также измеренной и расчетной электропроводности. Качество химико-аналитических измерений, проводимых в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН, подтверждалось участием в ежегодных международных верификациях (Intercomparison..., 2016).

Определение содержания нефтяных углеводородов проводили в течение 24 часов согласно методике ПНД Ф 14.1:2:4.5–95 (Количественный..., 1995). В бутылку с пробой воды добавляли четыреххлористый углерод (если проба была законсервирована, то добавляли столько, чтобы общее количество CCl<sub>4</sub> составляло 30 мл) и перемешивали в течение 54 мин. Затем эмульсию переносили в делительную воронку и отстаивали в течение 10 мин. После расслоения эмульсии нижний слой сливали в цилиндр. Экстракт сушили безводным сульфатом натрия (не менее 5 г сульфата натрия на 30 мл экстракта) до его осветления. Полученный экстракт очищали в хроматографической колонке, заполненной активированным оксидом алюминия, и измеряли объем полученного элюата. Анализируемую воду переливали из делительной воронки в мерный цилиндр и фиксировали ее объем. Дальнейший анализ проводили согласно методике ПНД Ф 16.1:2.2.22–98 (Количественный..., 1998), основанной на измерении интегральной интенсивности поглощения C–H-связей метильных и метиленовых групп различных классов органических соединений в неполярных и малополярных растворителях с использованием анализатора АН-2 (Нефтехимавтоматика).

Гранулометрический состав донных отложений определялся при помощи многофункционального анализатора частиц серии LS13 320 (Beckman Coulter, США), размер частиц донных отложений на этом анализаторе определялся методом лазерной дифрактометрии в воде на основе использования физического принципа рассеяния электромагнитных волн различной длины. Технические особенности прибора позволяют анализировать частицы размером от 0,04 мкм до 2,0 мм в соответствии со стандартом ISO 13320-1. Определение содержания главных элементов (Si, Al, Fe, Na, Ca, K, Mn, Ti, Ри S) в донных отложениях проводилось при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X (Thermo Fisher Scientific, США). Перед РФА-анализом образцы донных отложений просушивались в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса изучаемых образцов. Анализ потерь при прокаливании (ППП или LOI (loss on ignition)), характеризующий содержание органического вещества в донных отложениях\*, проводится весовым способом после прокалывания образцов при температуре 500 °С в муфельной печи.

Содержание редких и рассеянных элементов (Li, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) определялось масс-спектральным

---

\* Органические соединения выгорают обычно в диапазоне температур от 100 до 500 °С.

методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific, США). Подготовка к анализу заключалась в просушивании проб донных отложений в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса изучаемых образцов и в истирании до порошкообразного состояния на лабораторном стирателе или в ступке при помощи пестика. Для оценки валового содержания редких и рассеянных элементов разложение образцов донных отложений проводится путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовались аналитические навески образцов массой 0,1 г, а в качестве стандартного (контрольного) образца — образец ГСО 7126-94 (химический состав донного ила озера Байкал БИЛ-1).

Для оценки интегрального уровня загрязнения донных отложений озер рассчитывался индекс антропогенной нагрузки PLI (Pollution Load Index):

$$PLI = (CF_1 \cdot CF_2 \cdot \dots \cdot CF_n)^{1/n},$$

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 ( $PLI > 3$ ).

Для постадийной экстракции форм тяжелых металлов в работе использовали следующие реагенты (Ladonin, Karpukhin, 2011; Состав..., 2012):

1-я фракция — 1М раствор  $MgCl_2$  для извлечения обменных катионов металлов и металлоидов;

2-я фракция — 1М раствор  $CH_3COONa + CH_3COOH$ , pH 5 для извлечения металлов, специфически сорбированных различными компонентами осадка;

3-я фракция — раствор  $K_4P_2O_7$ , pH 11 для извлечения металлов, связанных с органическим (гумусовым) веществом донных осадков;

4-я фракция — 0,04М  $NH_2OH \cdot HCl$  в 25 %-м  $CH_3COOH$ , pH 2 для экстракции тяжелых металлов, связанных с гидратированными оксидами Fe и Mn;

5-я фракция — остаточная (устойчивая) фракция, которая вычисляется при помощи вычитания суммы результатов предыдущих четырех фаз из валового содержания химического элемента.

Для оценки подвижности металлов использован показатель вероятности вторичного загрязнения воды (RAC) (Heavy metal..., 1985; Metal fractionation..., 2011). RAC вычислялся для поверхностного слоя осадков (0–10 см), который наиболее активно взаимодействует с водной толщей и является местообитанием бентических сообществ. Данный индекс учитывает процентное содержание обменных (фракция 1) и специфически сорбированных (фракция 2) форм металлов. Согласно RAC, выделяют пять степеней риска: менее 1 % — отсутствие риска, 1–10 % — низкая степень, 10–30 % — средняя, 30–50 % — высокая, более 50 % — очень высокая.

Исследование форм и химического состава частиц в снеге проводилось при помощи электронного микроскопа (СЭМ) VEGA II LSH в лаборатории Института геологии КарНЦ РАН. В ходе анализа осуществлялся поиск частиц, содержащих тяжелые металлы, которые являются главными агентами антропогенного загрязнения окружающей среды. При пробоподготовке сухой осадок предварительно смешивался с эпоксидной смолой и наносился на стекло. После затвердевания смеси образец был отполирован и покрыт тончайшим слоем углерода.

Для анализа содержания нефтяных углеводородов в донных отложениях образцы высушивали в лаборатории до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Дальнейший анализ проводили согласно методике ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 (Количественный..., 1998).

Навеску пробы (0,5–3,0 г) помещали в колбу на 100 мл с притертой пробкой, заливали 10 мл четыреххлористого углерода и перемешивали в течение 20 мин. Полученный экстракт фильтровали через бумажный фильтр «белая лента». Экстракцию повторяли еще два раза с новыми порциями четыреххлористого углерода по 10 мл каждая. Все экстракты объединяли и записывали общий объем. 10 мл экстракта очищали в хроматографической колонке, заполненной активированным оксидом алюминия, и измеряли объем полученного элюата.

Анализ проб на содержание нефтяных углеводородов проводили методом ИК-спектроскопии, основанным на измерении интегральной интенсивности поглощения C–H-связей метильных и метиленовых групп различных классов органических соединений в неполярных и малополярных растворителях, с использованием анализатора АН-2 (Нефтехимавтоматика).

Пробы планктона концентрировались в лабораторных условиях седиментационным (отстойным) методом. Биомасса фитопланктона подсчитывалась счетно-объемным методом на основе определения индивидуального объема клеток (или плотных колоний) каждого вида, рассчитанного по формулам объема сходных геометрических фигур (Гусева, 1959; Кузьмин, 1984; Tikkanen, 1986). Подсчет численности и таксономическая идентификация водорослей и цианобактерий осуществлялись в камере «Нажотта» объемом 0,1 мл на световых микроскопах Motic BA300 и Nikon Eclipse E200 с иммерсионными объективами. Названия таксонов приведены в соответствии с международной альгологической базой данных (Guiry, Guiry, 2022). Обработка планктонных проб, определение видов и необходимые расчеты проводили по общепринятым методикам гидробиологического мониторинга (Руководство..., 1992; Методы..., 2019).

Индивидуальную массу представителей зоопланктона рассчитывали на основе уравнения зависимости между длиной и массой тела планктонных коловраток и ракообразных (Ruttner-Kolisko, 1977; Балущкина, Винберг, 1979). Индекс сапробности  $S = Ish/Xh$  по Пантле и Букк в модификации Сладечека (Pantle, Buck, 1955; Sladecsek, 1973) вычисляли, исходя из индивидуальных характеристик сапробности видов, согласно общепринятым методикам (Макрушин, 1974). Оценку качества воды по показателям зоопланктона проводили в соответствии с «Правилами контроля качества воды водоемов и водотоков»\*.

Для характеристики трофического статуса вод анализировали содержание хлорофилла *a* (Хл *a*) в планктоне. Концентрацию Хл *a* определяли путем фильтрации проб воды объемом 600 мл через мембранный фильтр с диаметром пор 0,47 мкм с помощью шприца Millipore с фильтровальной насадкой. Фильтрацию проводили непосредственно на водоеме, чтобы избежать изменений содержания фотосинтетических пигментов в ходе транспортировки проб воды.

---

\* Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков: ГОСТ 17.1.3.07-82: введен в действие постановлением Госстандарта СССР от 19 марта 1982 г. № 1115. URL: <https://base.garant.ru/5370540/>.



Экстракцию хлорофиллов выполняли раствором ацетона (90 %, ЧДА), оптическую плотность экстрактов измеряли на спектрофотометре Hitachi UV-VIS 181. Концентрацию пигментов рассчитывали общепринятыми в мировой и отечественной практике методами по схеме, отработанной в ИППЭС КНЦ РАН (Determination..., 1996; Минеева, 2004; Денисов, Кашулин, 2013). Трофический статус вод оценивали по шкале С. П. Китаева (2007).

Анализ бентосных проб проводили с использованием рекомендованных стандартных методик (Руководство..., 1992). Определение беспозвоночных проводилось по Определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России (2016), Определителю пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий под редакцией С. Я. Цалолихина (2000, 2001) и по работе “An introduction the aquatic insects of North America” (Merritt, Cummins, 1984). Выделение доминирующих в составе сообществ таксонов проводили отдельно по численности и биомассе беспозвоночных, используя классификацию С. Ульфстранда, согласно которой доминанты составляют не менее 25 %, а субдоминанты — не менее 10 % от общей биомассы (Ulfstrand, 1968). Для оценки экологического состояния озер использовались наиболее распространенные в системах экологического мониторинга водных объектов биотические индексы: индекс Шеннона — Уивера, рассчитанный с учетом численности видов, индекс доминирования Бергера — Паркера, индекс выравненности Пиелу, олигохетный индекс Гуднайта — Уитлея и Кольский биотический индекс (Яковлев, 2005) — биотический индекс р. Трент, модифицированный учетом особенностей региональной фауны.

Общую численность и биомассу бактерий определяли прямым методом флуоресцентной микроскопии на следующий день после отбора проб (микроскоп Olympus CX41). Использовали темноокрашенные поликарбонатные мембранные фильтры Nucleopor Black с диаметром пор 0,2 мкм. Фильтры для учета бактерий окрашивали акридином оранжевым. Бактерии микроскопировали с иммерсионным объективом 100х, окуляром 10х, учитывая клетки в 30 полях зрения. Численность бактерий рассчитывали по формуле

$$X = N \cdot 3,05 \cdot 10^6 / V \cdot A,$$

где  $X$  — количество бактерий в 1 мл воды или в 1 г донных отложений (на сырую массу);  $N$  — среднее количество клеток в поле зрения;  $3,05 \cdot 10^6$  — константа для данного микроскопа;  $V$  — объем профильтрованной суспензии, мл;  $A$  — разведение. Для расчета биомассы бактерий вес одной бактериальной клетки считали равным  $4 \cdot 10^{-14}$  г.

Этот метод учета численности бактерий более точен, так как позволяет учитывать и живые, и мертвые клетки всех групп бактерий, в т. ч. и некультивируемых на питательных средах, за исключением ультрамелких форм бактерий.

Численность сапротрофных бактерий определяли на мясопептонном агаре (МПА). Сапротрофные бактерии, использующие органические соединения азота, чувствительны не только к источникам питания, но и к изменению кислотно-щелочного режима среды и окислительно-восстановительного потенциала (Eh), характеризующего уровень окисления или восстановления вещества.

Численность олиготрофных бактерий определяли на слабоминерализованной среде Эшби.

Для культивирования бактерий группы кишечной палочки и патогенных бактерий была использована среда Левина — цветная элективная питательная среда, содержащая МПА, лактозу, эозин и метиленовый синий. Входящие в состав среды Левина органические красители задерживают рост сапрофитов. Учитывали бактерии, имеющие темно-фиолетовую окраску с зеленоватым оттенком, относящиеся к группе кишечной палочки. Патогенные бактерии — возбудители брюшного тифа, сальмонеллез, дизентерии — не разлагают лактозу и растут на среде Левина в виде мелких, круглых, прозрачных, чаще бесцветных колоний, иногда с розоватым или голубоватым оттенком. Для выделения и количественного учета *Staphylococcus aureus* использовался агар Байрда-Паркера.

Санитарно-микробиологический анализ воды исследуемых водоемов выполнен в соответствии со нижеприведенными нормативными требованиями (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Нормативные документы и методики  
санитарно-микробиологических исследований природных вод

Параметры	Нормативные документы. Методики	Нормативы
ОКБ (общие колиформные бактерии)	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания	Не более 500 КОЕ/100 мл (для купания) Не более 1000 КОЕ/100 мл (для занятия водным спортом)
Кишечная патогенная флора, в т. ч. сальмонеллы	СанПиН 2.1.5.980-00. Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к охране поверхностных вод	Вода не должна содержать возбудителей кишечных инфекций
	МУК 4.2. 1884-04. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. Методические указания. Гигиенические требования к охране поверхностных вод	
	СанПиН 3.2.1333-03. Профилактика паразитарных болезней на территории Российской Федерации	

Виды рыб из сетных уловов определяли по каталогу (Fricke et al., 2021). Обработка материала проводилась по стандартной методике (Правдин, 1966). Массу рыб определяли с точностью до 1 г, длину по Смиту (FL) измеряли с точностью до 1 мм. Стадия зрелости гонад исследуемых видов рыб определялась по шестибалльной шкале (I–VI). Рыбы считались половозрелыми при стадии зрелости гонад III–IV (Правдин, 1966). Возраст у кумжи и ряпушки определялся

по чешуе, у щуки и окуня — по клейтруму и жаберной крышке соответственно (Чугунова, 1959). Желудки рыб извлекались и фиксировались в 70 %-м растворе этилового спирта в течение 1–1,5 часов. Материал обрабатывался в лаборатории с использованием микроскопа (Методическое..., 1974). Объекты питания определялись до семейства или рода (Определитель..., 2000, 2001). При анализе питания сига использовался индекс относительной значимости ( $IR$ , %) (Попова, Решетников, 2011). Все характеристики были даны в виде средней арифметической и стандартной ошибки. Полученные данные сравнивали, достоверность различий определяли с помощью  $t$ -теста Стьюдента. Различия считались статистически значимыми при  $p \leq 0,05$ .

Для проведения биогеохимического накопления загрязнителей в органах рыб было отобрано по 10 экземпляров окуня и щуки из оз. Семеновское и 10 экземпляров окуня из оз. Окунево. Основное внимание уделено оценке накопления в рыбах Cu, Ni, Mn, Zn, Sr, Co, Cr, Cd, Pb, V, Mo, Sb и W. Валовое содержание V, Ni, Cu, Zn, Co, Pb, Sn, Sb, Mo, W, Sr, Mn, Cr и Cd в печени, почках, скелете, жабрах и мышцах рыб определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой после микроволнового разложения. Каждый образец ткани рыбы сушили до постоянной массы при температуре 105 °С. Навески сухих проб порядка 10–100 мг для почек, 50–300 мг для печени, скелета, мышц и жабр помещали в автоклавы для микроволнового разложения. Ткани рыб из оз. Окунево разлагали в системе микроволнового разложения MASTER-16 (SINEO, КНР), ткани рыб из оз. Семеновского — в системе MWS 4 (Berghoff, Германия). Для разложения образцов могут быть использованы различные смеси высококислотных или перегнанных кислот. На практике часто наиболее встречаются и входят в рекомендуемые инструкциями пользователей различных микроволновых систем смеси концентрированных хлороводородной HCl и азотной HNO<sub>3</sub> кислот или концентрированная азотная кислота HNO<sub>3</sub> с добавкой пероксида водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (ос. ч, 33 %).

При разложении в системе MASTER-16 (SINEO, КНР) к навеске, помещенной во фторопластовый автоклав, добавляли 10 мл перегнанной концентрированной HNO<sub>3</sub> (ос. ч.) и оставляли на 16–20 часов, не укупоривая. За это время проходило частичное разложение пробы с удалением из реакционного пространства части газообразных продуктов. После этого в автоклавы добавляли 2 мл H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (ос. ч., 33 %). Процесс разложения с использованием микроволнового излучения, повышенных температур и давления проводили при мощности 1600 Вт и температуре 150 °С в течение 20 мин, затем при 180 °С в течение 25 мин. Раствор из автоклавов количественно переносили в мерные пробирки на 50 мл и доводили до фиксированного объема 25 мл добавлением 2 %-й HNO<sub>3</sub>.

В случае разложения в системе MWS 4 к навеске в автоклав добавляли 4,5 мл смеси концентрированных азотной HNO<sub>3</sub> и соляной кислот HCl в соотношении 8:1 и 2 мл деионированной воды H<sub>2</sub>O (1-й класс чистоты по ГОСТ Р 52501). Разлагали ступенчато — по 10 мин на каждой ступени при мощности микроволновой системы 800 Вт и температурах 160 и 180 °С, далее на третьей ступени при мощности 900 Вт и температуре 190 °С. После охлаждения количественно переносили раствор из автоклавов в градуированные пробирки и доводили до фиксированного объема 10 мл добавлением деионированной воды.

Для получения рабочих растворов исходный раствор пробы разбавляли 2 %-й азотной кислотой в 3–15 раз пропорционально величине навески.

Полученные растворы анализировали на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 (Perkin Elmer, США). Режим работы спектрометра: мощность плазмы — 1350 Вт, динамическое изменение напряжения на линзе при сепарации масс — от 5 до 272 а. е. м., поток газа-распылителя (высокоочищенный аргон по ГОСТ 10157-2016) — 0,98–1,1 мл/мин. Настройками масс-спектрометра устанавливали уровень оксидных и двухзарядных ионов не более 2,7 и 2,0 % соответственно. При построении градуировочных зависимостей для V, Ni, Cu, Zn, Co, Pb, Sr, Mn, Cr и Cd использовали стандартный мультиэлементный раствор ICP-MS-68A Solution A (Perkin Elmer, США), а для Sn, Sb, Mo и W — стандартный мультиэлементный раствор ICP-MS-68A Solution B (Perkin Elmer, США).

Для оценки качества анализа использовали стандартные образцы (СО) белка рыбы DORM-4 и DORM-3 (National Research Council of Canada, Канада) с микропримесями металлов, прошедшие ту же процедуру пробоподготовки и анализа, что и исследуемые образцы рыб.

В ходе анализа установлено, что разложение проб в смеси хлороводородной и азотной кислот не позволяет определить содержание ванадия и хрома с допустимой погрешностью без применения дополнительной коррекции результатов. Наличие хлора в кислотном растворе пробы влечет за собой негативные последствия в виде появления спектральных помех от плазмохимически образованных соединений хлора и кислорода. Так, на 51 массу 51V спектрально влияет наложение от оксохлоридной частицы 35Cl16O, а на 53 массу 53Cr влияет полиоксидное искажение масс-спектра от частицы 37Cl16O. Эти помехи завышают аналитический сигнал в разы. Если пробы были разложены с использованием хлороводородной кислоты, то для определения ванадия и хрома проводили математическую коррекцию результата с учетом холостого опыта и уточняли результаты методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС).

По данным National Research Council Canada\*, в сертифицированном эталонном материале DORM-4 для установления содержания следовых количеств металлов концентрация хрома —  $1,87 \pm 0,18$  мг/кг, ванадия —  $1,57 \pm 0,14$  мг/кг. В DORM-3 концентрация хрома —  $1,89 \pm 0,17$  мг/кг, концентрация ванадия — не аттестована, поэтому в качестве опорных учитывали данные, полученные методом ИСП-АЭС. Правильность ИСП-АЭС анализа проверяли методом добавок, используя ГСО 7267-96 состава ионов ванадия и ГСО 7257-96 состава ионов хрома. Расхождение результатов метода ИСП-АЭС и откорректированных значений ИСП-МС менее чем на 9 %, что позволило считать корректировку спектральных помех приемлемой.

---

\* URL: <https://nrc.canada.ca/en/certifications-evaluations-standards/certified-reference-materials/list/49/html> (дата обращения: 10.11.2021).

## Глава 5 РАСПОЛОЖЕНИЕ, ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕР ГОРОДА МУРМАНСКА

Все исследованные озера находятся в пределах или вблизи границ города Мурманска. На рис. 5.1 показано расположение всех изученных водных объектов с указанием основных городских источников загрязнения. Названия озер Семеновское, Большое, Среднее, Окуновое, Ледовое взяты из открытых официальных источников. Озера Северное, Треугольное и Южное не имели официальных наименований, и названия им были даны в ходе проведения лимнологических исследований по месту расположения водоемов относительно границ города (Северное и Южное) или по форме котловины водоема (Треугольное).

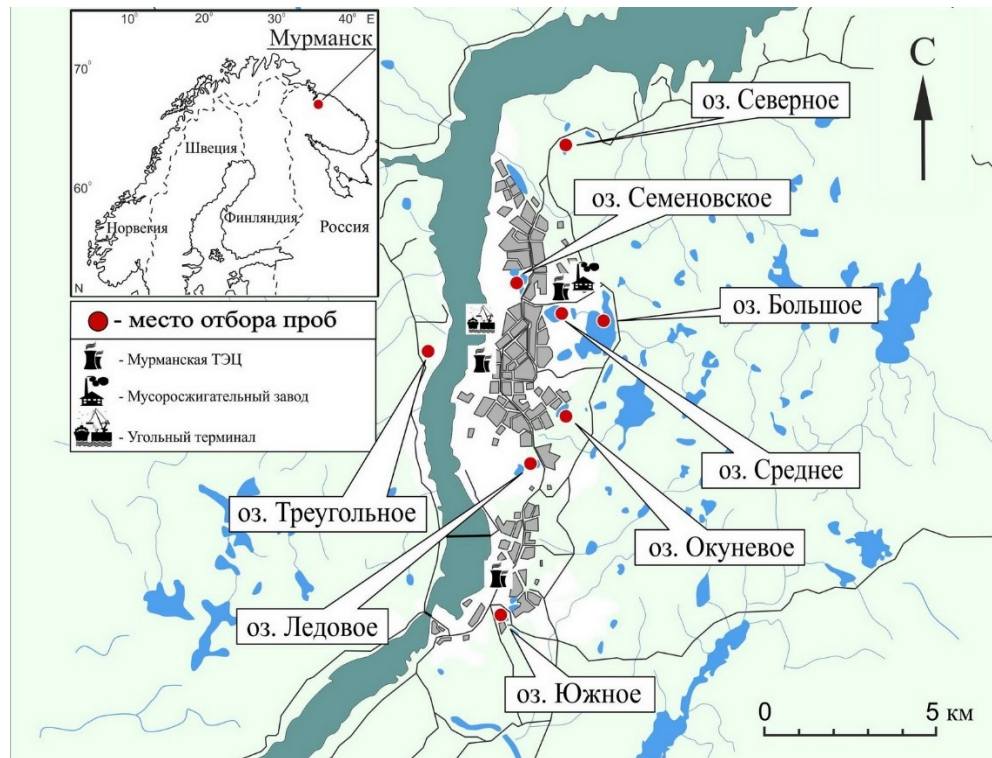


Рис. 5.1. Карта-схема расположения изученных озер г. Мурманска (автор Черепанов А.)

Все изученные озера имеют естественное ледниковое происхождение с возможным влиянием тектоники на формирование озерных котловин. Их основные измеренные и рассчитанные морфометрические параметры приведены в табл. 5.1. Далее дается описание каждого озера в отдельности, с демонстрацией карт глубин каждого озера (кроме оз. Большое) и карт водосборных площадей.

Таблица 5.1

Основные морфометрические показатели изученных озер г. Мурманска

Озеро	Площадь, км <sup>2</sup>		Длина береговой линии, м	Объем, км <sup>3</sup>	Длина (макс), м	Глубина, м	
	озера	водосбора озера				макс	сред.
Северное	0,009	0,117	520	0,00016	230	3,9	1,8
Семеновское	0,213	1,303	3200	0,00051	730	11,3	2,4
Среднее	0,248	1,014	1990	0,00191	700	23,5	7,7
Окунево	0,048	2,010	1270	0,00011	550	5,6	2,3
Ледовое	0,040	3,456	780	0,00031	270	15,7	7,8
Южное	0,053	0,808	1130	0,00016	430	11,3	3,1
Треугольное	0,100	0,397	550	0,00056	160	8,6	5,6
Большое	1,320	19,170	Н/д	Н/д	2500	Н/д	Н/д

Примечание. Н/д — нет данных или их невозможно рассчитать.

**Северное (69.03278° с. ш. и 33.11830° в. д.).** Это природный водоем, расположенный к северу от г. Мурманска, вдоль дороги, ведущей к г. Североморску. Северное — самое маленькое по площади (0,009 км<sup>2</sup>) озеро из всех исследованных для данной работы (рис. 5.2). Водоем имеет простую продолговатую котловину с максимальной глубиной 3,9 м в центре озера, ближе к восточному берегу. Озеро окружено лесом, берега высокие, особенно восточный скалистый берег. Вдоль западного берега проходит автомобильная дорога. Южный и северный берега заболочены и захламлины бытовым мусором. Водосборная площадь озера — самая маленькая (0,117 км<sup>2</sup>) среди всех озер, изученных для данной работы (рис. 5.3).

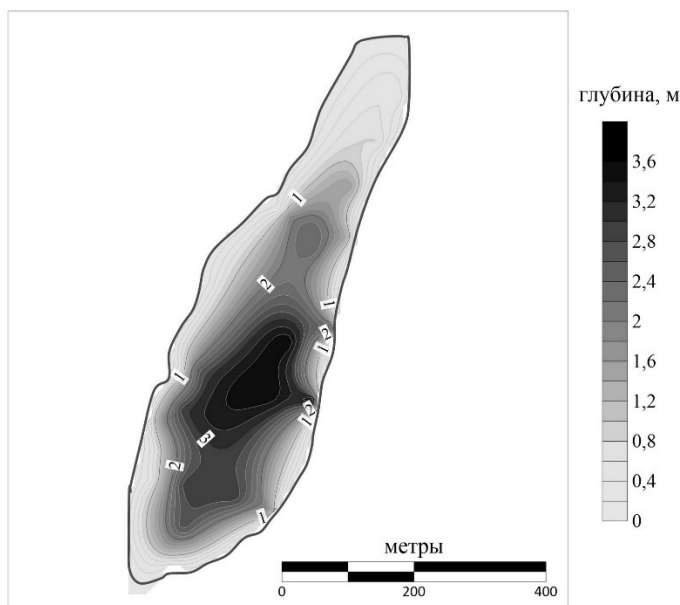


Рис. 5.2. Карта глубин оз. Северное (автор Сыроежко Е.)

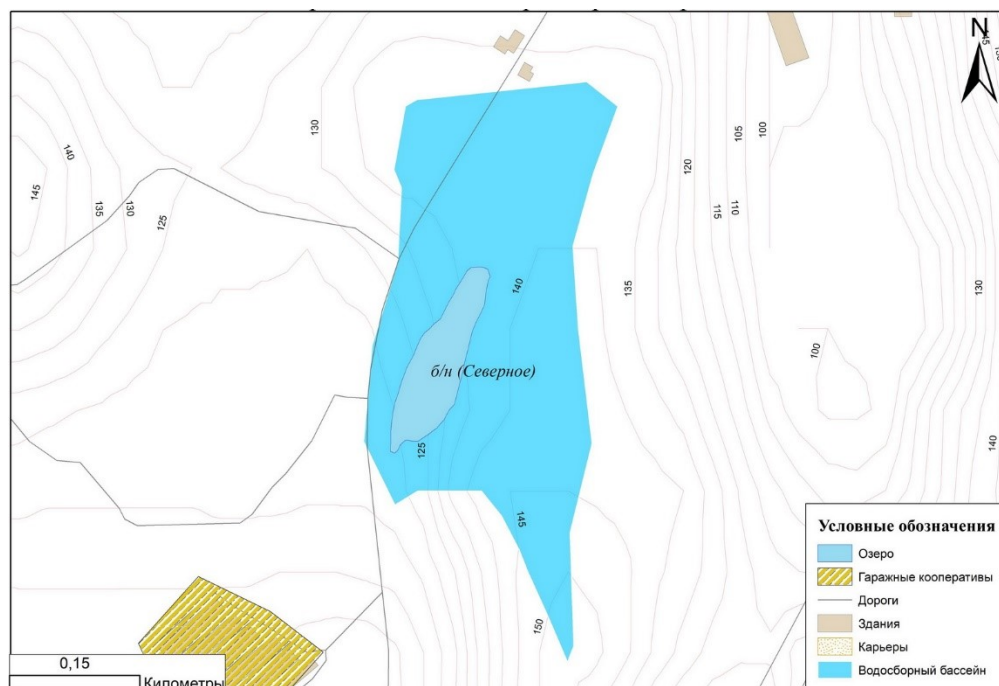


Рис. 5.3. Водосборная площадь оз. Северное (автор Мицуков А.)

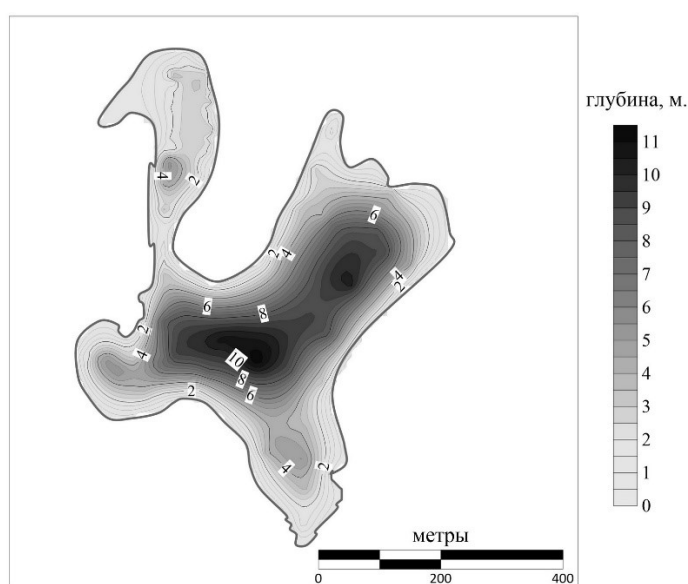


Рис. 5.4. Карта глубин оз. Семеновское (автор Сыроежко Е.)

**Семеновское (68.99080° с. ш. и 33.08851° в. д.)** — природное озеро, расположенное в центральной части г. Мурманска (Ленинский район). Его площадь составляет 0,213 км<sup>2</sup>. Котловина водоема имеет сложную структуру и состоит из двух основных плесов, соединенных небольшим проливом. Главный плес широкий, с двумя участками наибольших глубин озера — 10,2 и 11,3 м

(рис. 5.4), второй плес — более узкий и мелководный. Берега низкие и скалистые, загрязнены бытовым мусором. К озеру плотно примыкают автомобильные дороги и жилая застройка (рис. 5.5). В 2 км от озера расположены угольный терминал и Мурманская ТЭЦ, в 2,5 км расположен завод по переработке ТБО. Озеро активно используется местными жителями в рекреационных целях (отдых на берегу, купание, рыбалка) (рис. 5.6), на одном из его берегов расположен городской парк с аттракционами. Кроме того, на этом городском водоеме проводился чемпионат по зимнему плаванию.

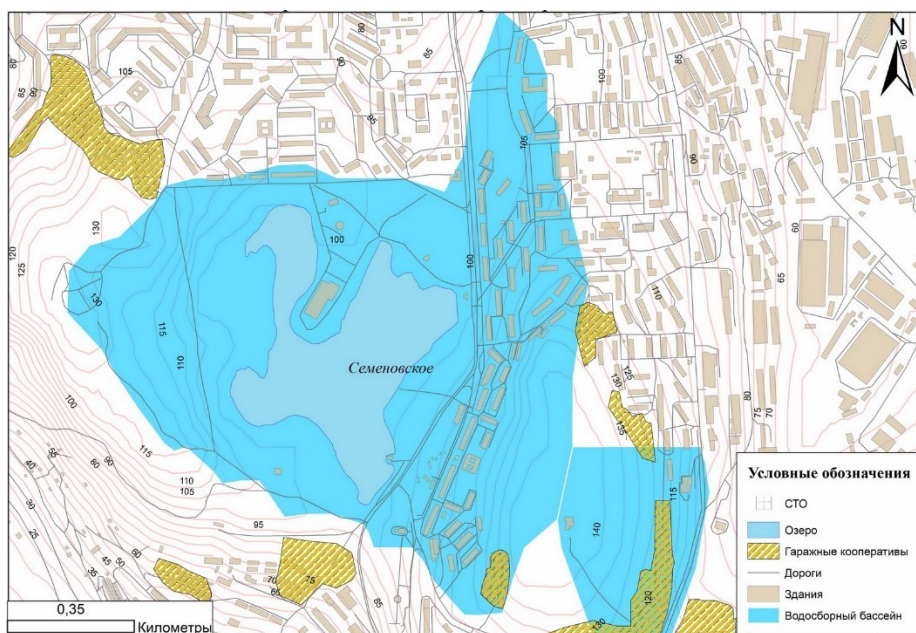


Рис. 5.5. Водосборная площадь оз. Семеновское (автор Мицуков А.)



Рис. 5.6. Отдых на берегу оз. Семеновское летом 2019 г. (фото Слуковского З. И.)



**Среднее (68.98147° с. ш. и 33.12422° в. д.)** — водоем природного происхождения, расположенный в центре города Мурманска, ближе к восточной границе Октябрьского района. Котловина озера имеет простую, близкую к округлой форму с максимальной глубиной (23,5 м) в центральной части водного объекта (рис. 5.7). Озеро Среднее — самый глубокий водоем города Мурманска из числа тех, в которых была проведена батиметрическая съемка. Его площадь составляет 0,248 км<sup>2</sup>. Берега песчаные и скалистые.

На водосборе озера расположены жилая застройка, гаражные кооперативы, автомобильные дороги и АЗС (рис. 5.8). В 1 км от озера находится Мурманская ТЭЦ (Восточная котельная), в 1,5 км — мусоросжигательный завод, а в 2,5 км — угольный терминал. В летнее время озеро используется местными жителями в рекреационных целях.

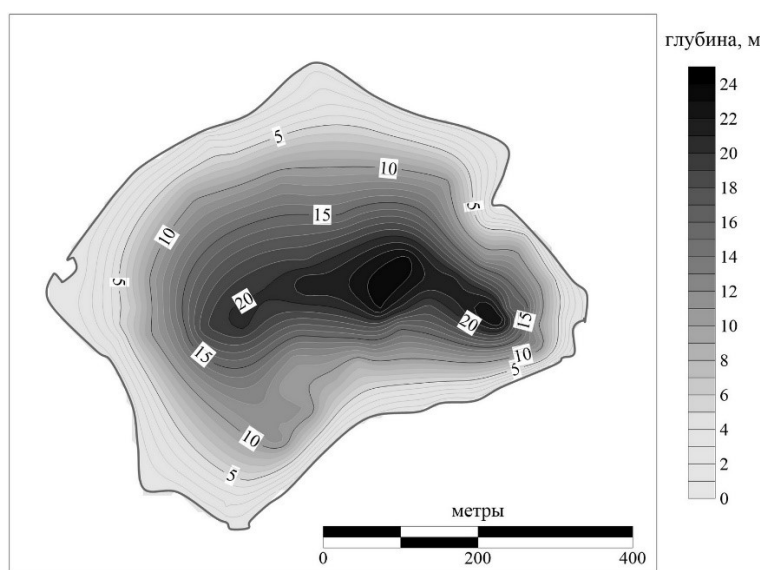


Рис. 5.7. Карта глубин оз. Среднее (автор Сыроежко Е.)

**Окуневое (68.95012° с. ш. и 33.12734° в. д.)** — природный водоем, расположенный в центре г. Мурманска (Первомайский район). Котловина озера имеет вытянутую овальную форму с максимальной глубиной (5,6 м) в центре (рис. 5.9). Северная часть водоема более глубокая по сравнению с южной, мелководной. Площадь оз. Окуневое составляет 0,048 км<sup>2</sup>. Правый и левый берега высокие и скалистые, южный и северный — низкие, валунно-илистые. По всему периметру озеро окружено лесом.

На водосборной территории в основном находятся административная (больница, спортшкола) и жилая застройка, а также дороги (рис. 5.10). Из-за особенностей рельефа местности в центральной части города оз. Окуневое имеет одну из самых больших водосборных площадей среди малых озер. В 3 км от водоема находится центральная ТЭЦ, в 4,5 км — угольный порт и завод по переработке мусора. Озеро активно используется местными жителями и гостями города в рекреационных целях: летом это купание и рыбалка, зимой на озере катаются на лыжах (рис. 5.11).

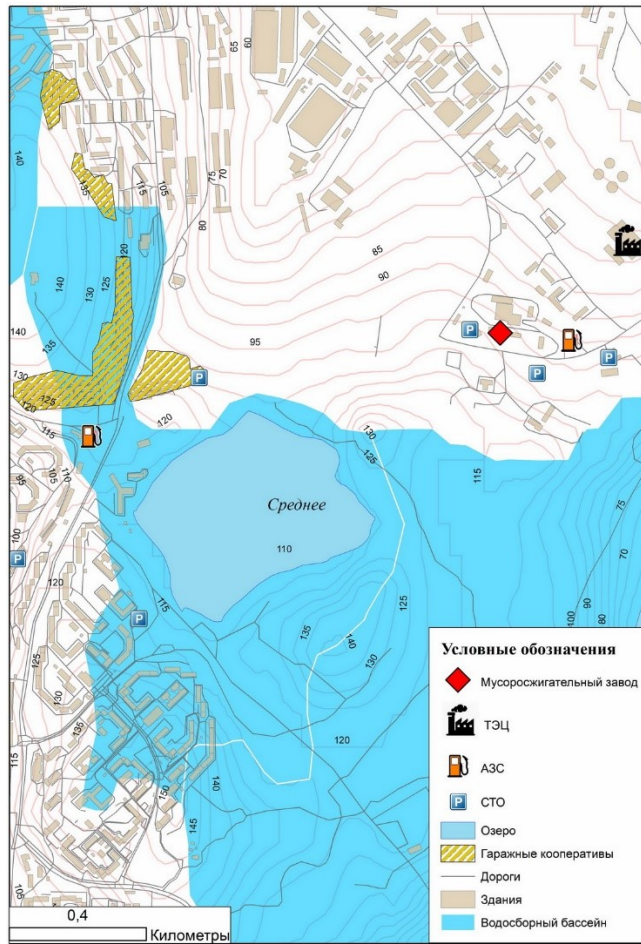


Рис. 5.8. Водосборная площадь оз. Среднее (автор Мицуков А.)



Рис. 5.9. Карта глубин оз. Окуневое (автор Сыроежко Е.)

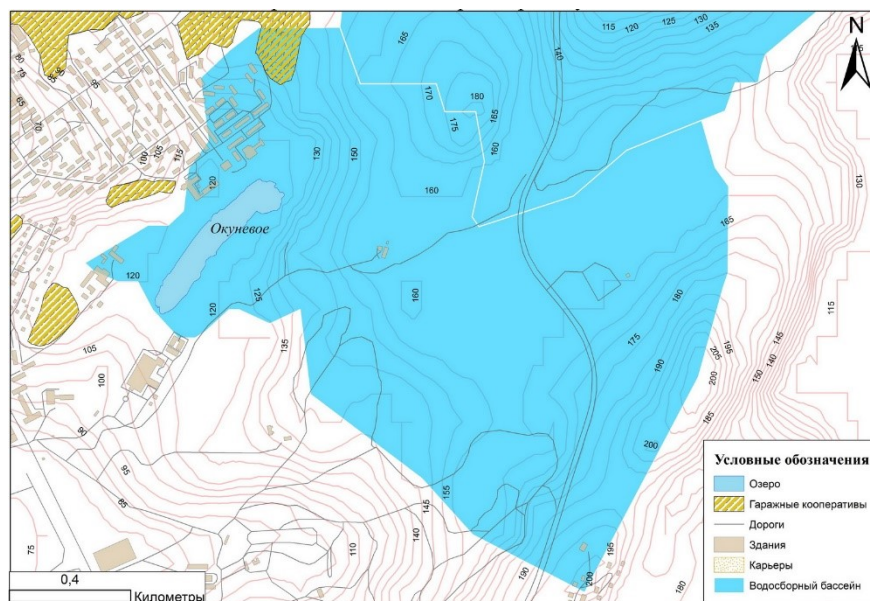


Рис. 5.10. Водосборная площадь оз. Окуневое (автор Мицуков А.)



Рис. 5.11. Вид на оз. Окуневое, лето 2018 г. (фото Слукковского З. И.)

**Ледовое** ( $68.93313^{\circ}$  с. ш. и  $33.10451^{\circ}$  в. д.) — природный водоем, расположенный в центральной части г. Мурманска (Первомайский район). Озеро имеет простую котловину почти округлой формы с максимальной глубиной (15,7 м) в центральной части (рис. 5.12). Его площадь составляет  $0,04 \text{ км}^2$ , площадь водосбора равна  $3,456 \text{ км}^2$ , по этому показателю озеро находится на втором месте после оз. Большое среди всех исследованных водоемов г. Мурманска (рис. 5.13). Берега оз. Ледовое низкие, песчано-илистые, а также искусственные (на восточном и южном берегах). В районе восточного берега, примыкающего к Кольскому проспекту, организована набережная, где проводят свой досуг местные жители. На водосборной площади озера расположены жилая

застройка, автомобильные дороги, автостоянки, АЗС, гаражные кооперативы и карьер. В озеро впадает ручей Варничный, который считается одним из самых грязных водотоков в Мурманской области.

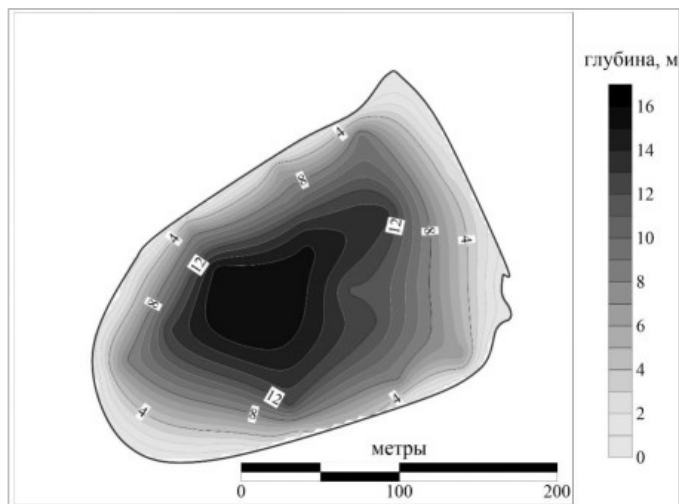


Рис. 5.12. Карта глубин оз. Ледовое (автор Сыроежко Е.)

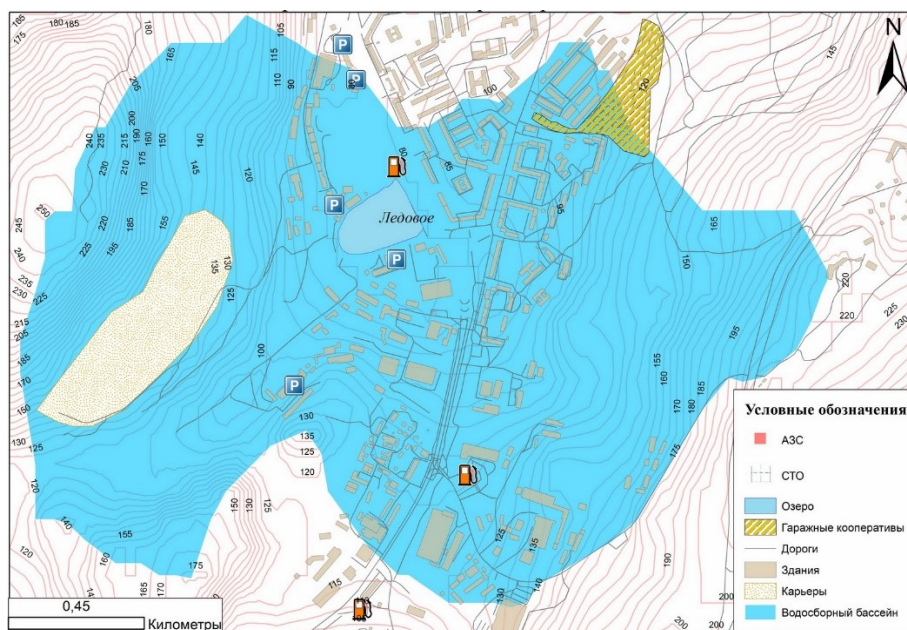


Рис 5.13. Водосборная площадь оз. Ледовое (автор Мицуков А.)

**Южное** ( $68.88469^\circ$  с. ш. и  $33.07660^\circ$  в. д.) — водоем естественного происхождения, расположен в южной части г. Мурманска, на границе с г. Кола. Котловина озера простая, продолговатая, с максимальной глубиной (11,3 м) в центральной части водоема, ближе к северо-восточному берегу (рис. 5.14). Его площадь составляет  $0,053 \text{ км}^2$ , площадь водосборного бассейна —  $0,808 \text{ км}^2$ .

Берега песчано-каменные, крутые, частично огражденные бетонным забором, так как озеро находится в окружении складов и гаражных кооперативов.

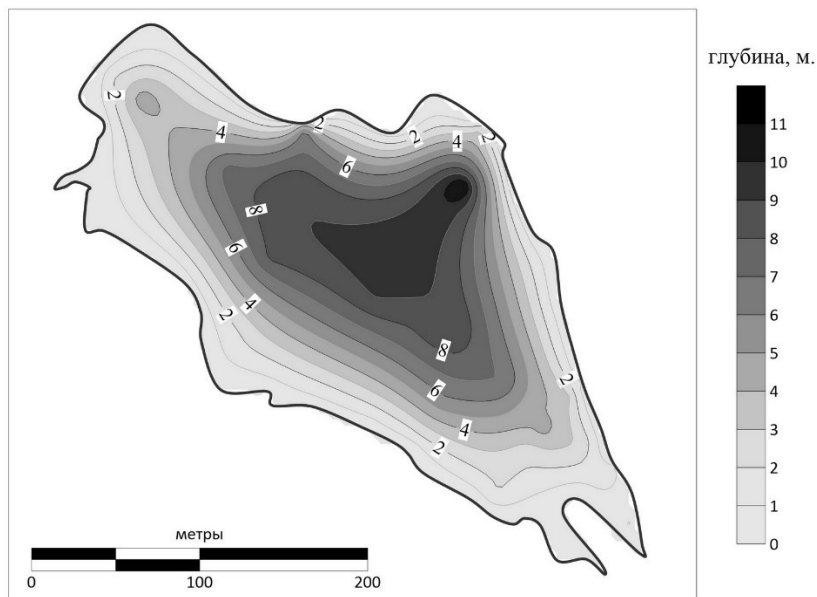


Рис. 5.14. Карта глубин оз. Южное (автор Сыроежко Е.)

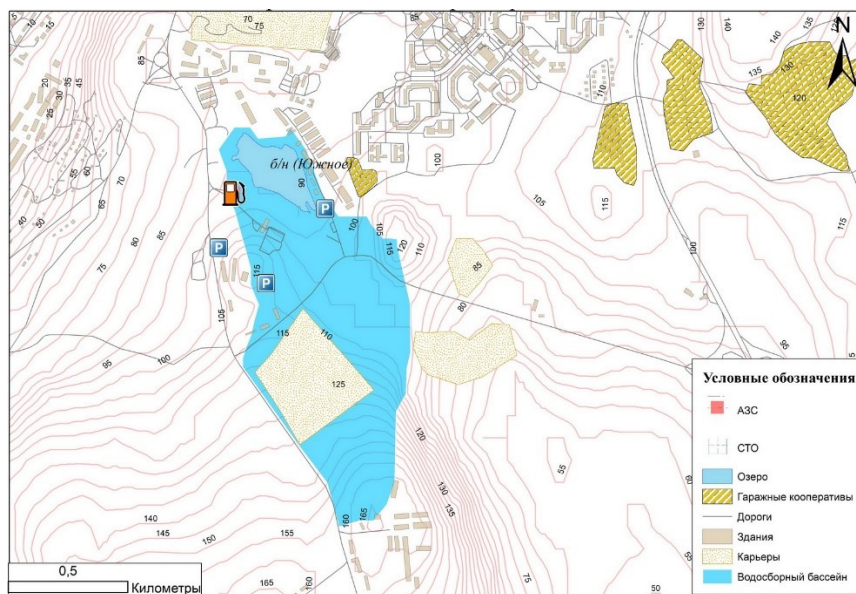


Рис. 5.15. Водосборная площадь оз. Южное (автор Мицуков А.)

На водосборе оз. Южное также находятся две автомобильные парковки, АЗС и карьер (рис. 5.15), в 1,5 км от озера работает южная котельная Мурманской ТЭЦ. Угольный терминал и мусоросжигательный завод расположены в 11 и 12 км от него соответственно. Из-за своего расположения среди складов водоем

не имеет нормального подхода и поэтому слабо используется местными жителями в рекреационных целях (рис. 5.16).



Рис. 5.16. Вид на оз. Южное (фото Слуковского З.)

**Треугольное (68.967875° с. ш. и 33.002587° в. д.)** — озеро естественного происхождения, расположенное в Первомайском районе г. Мурманска на западном берегу Кольского залива (недалеко от Абрам-мыса), треугольной формы, отчего и получило свое название. Котловина имеет простое строение, максимальная глубина — 8,6 м, в центральной части водоема, ближе к восточному берегу (рис. 5.17). Площадь озера составляет 0,1 км<sup>2</sup>, водосборная площадь — в четыре раза больше (0,397 км<sup>2</sup>). Берега водоема низкие: в северной и восточной части озера заболоченные, в западной и южной — скалистые.

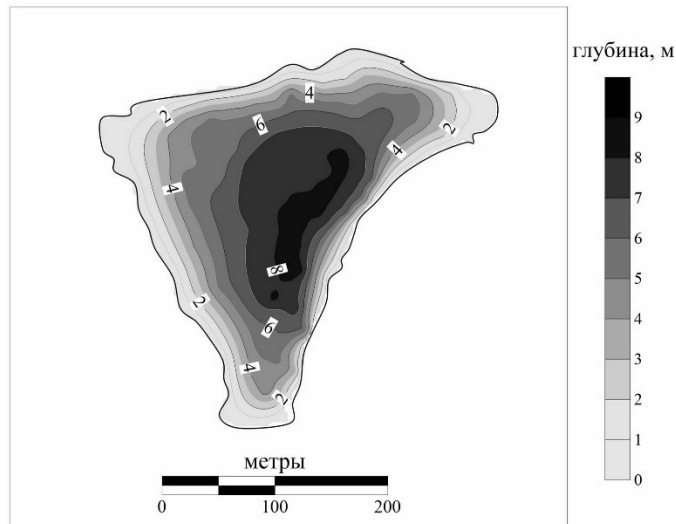


Рис. 5.17. Карта глубин оз. Треугольное (автор Сыроежко Е.)

Водоем окружен лесом (рис. 5.18), рядом проходит неиспользуемая асфальтированная дорога. Прямых источников загрязнения рядом с озером нет. Угольный терминал и Мурманская ТЭЦ расположены на расстоянии примерно 6–7 км от водоема. Озеро используется местными жителями в рекреационных целях (купание, отдых).

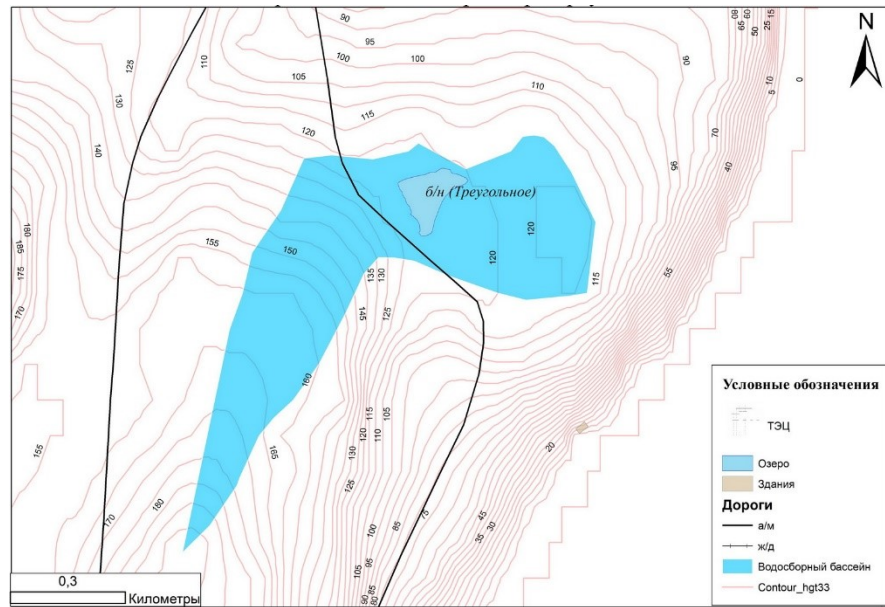


Рис. 5.18. Водосборная площадь оз. Треугольное (автор Мицуков А.)

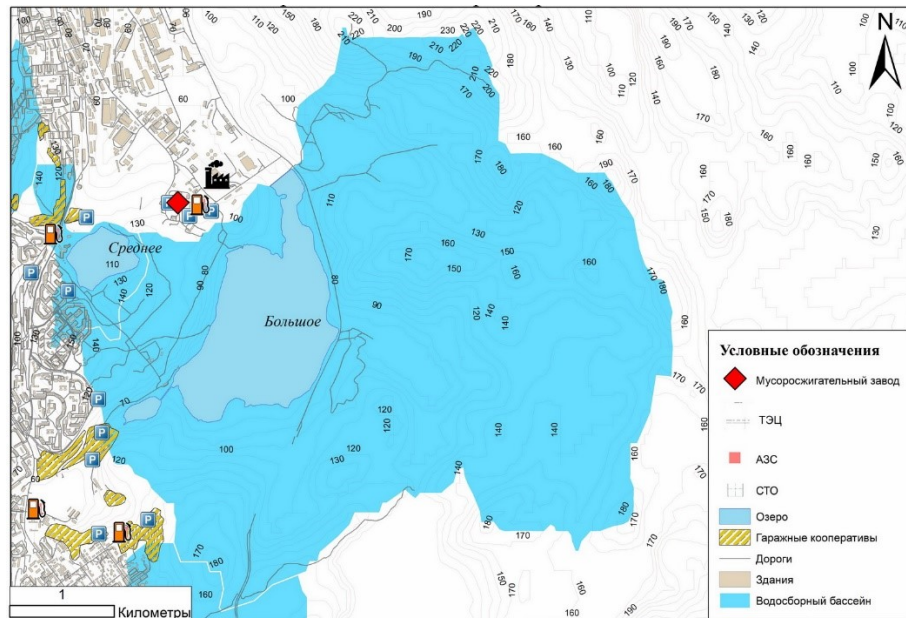


Рис. 5.19. Водосборная площадь оз. Большое (автор Мицуков А.)

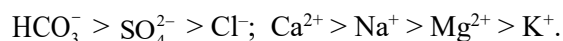
**Большое (68.975556° с. ш. и 33.163333° в. д.)** — как и следует из названия, самый большой водоем по площади зеркала (1,32 км<sup>2</sup>) и площади водосбора (19,170 км<sup>2</sup>) среди всех исследованных озер г. Мурманска. К сожалению, нет данных о его глубинах. Озеро имеет сложную котловину: оно разделено на два неравных по площади плеса — основной, на берегах которого находится водонапорная станция, и малый (узкий).

Вдоль всего восточного берега проходит объездная дорога (рис. 5.19). На водосборе водоема расположены жилая застройка, парковка и гаражные кооперативы со стороны города и природные ландшафты. Примерно в 1 км от северного берега находится Мурманская ТЭЦ (Восточная котельная) и мусоросжигательный завод. Помимо этого, оз. Большое используется для водоснабжения г. Мурманска, а также имеет важный рекреационный потенциал.

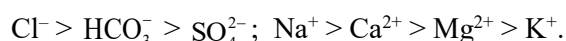


## Глава 6 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ ОЗЕР

**Минерализация, значения рН и главные ионы.** Для природных вод Кольского Севера характерна низкая минерализация — 20–30 мг/л и следующий порядок распределения главных ионов (Моисеенко и др., 1997):



В озерах, расположенных вблизи Баренцева моря, вследствие влияния морских аэрозолей основные ионы имеют другой порядок распределения (Аннотированный..., 2010):



Медианное значение рН воды находится на границе между слабокислым и нейтральным — 6,5.

Предварительные результаты исследований гидрохимического состава пяти озер Мурманска по итогам мониторинга 2018–2019 гг. были представлены в статье (Особенности..., 2021). В результате проведенных гидрохимических исследований было установлено, что химический состав воды озер г. Мурманска значительно отличается от состава озер ненарушенных территорий (табл. 6.1).

Выявлено также значительное различие в гидрохимии мурманских озер, что, свою очередь, отражает разницу в природных и антропогенных факторах формирования химического состава воды. Значение рН воды озер в 2018–2020 гг. находится в пределах от 6,09 до 9,34. Максимальное значение (практически на границе между щелочными и сильнощелочными) отмечено в оз. Ледовое, в которое поступают воды из сильно загрязненного руч. Варничного, вытекающего из оз. Карьерное, представляющего собой затопленный карьер строительных материалов, где добывали скальные породы (гнейсы). Руч. Варничный входит в десятку экстремально грязных водоемов (5-й класс загрязнения) России, по данным Гидрохимического института Росгидромета, опубликовавшего интерактивную карту степени загрязненности поверхностных вод суши России (gidrohim.com). По данным того же Гидрохимического института, руч. Варничный характеризуется следующими повышенными показателями: БПК<sub>5</sub>, ХПК, аммонийный азот, марганец, нефтепродукты, медь, АСПАВ, дефицит растворенного в воде кислорода. В оз. Ледовое, помимо руч. Варничный, впадает еще один водоток, который заключен в подземный коллектор. Труба этого коллектора выходит на южной стороне озера. Рядом с озером проходит центральная городская автомобильная магистраль — Кольский проспект. Высокие величины рН воды отмечены в оз. Южное: среднее значение — 8,04, диапазон — 7,78–9,11, что относится к щелочным и слабощелочным условиям. Воды остальных озер характеризуются нейтральными значениями рН, кроме оз. Большое, где водородный показатель находится на границе между слабокислыми и нейтральными значениями (6,45–6,49). В зимний период в отсутствие активной вегетации рН воды варьирует в небольшом диапазоне нейтральных значений по классификации О. А. Алекина (1970) (рис. 6.1).

Таблица 6.1

Медианные значения величин рН, главных ионов и минерализации (мг/л) озер г. Мурманска и восточной части Мурманской области (Аннотированный..., 2010)

№ п/п	Озера	рН	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Минерализация
1	Северное	7,01	24,9	5,6	79,6	3,9	24,2	23,6	145,4	312,4
2	Семеновское	6,91/ 6,64	<u>7,8</u> 8,0	<u>2,0</u> 2,0	<u>11,1</u> 11,0	<u>1,9</u> 1,9	<u>18,2</u> 19,3	<u>10,6</u> 10,8	<u>18,6</u> 18,2	<u>71,2</u> 71,4
3	Среднее	<u>7,40</u> 7,08	<u>18,6</u> 18,0	<u>3,9</u> 3,8	<u>17,3</u> 17,6	<u>3,8</u> 3,7	<u>42,1</u> 42,2	<u>30,8</u> 31,8	<u>24,3</u> 24,8	<u>140,6</u> 140,7
4	Большое	<u>6,47</u> 6,49	<u>3,1</u> 3,2	<u>1,2</u> 1,2	<u>9,9</u> 9,8	<u>0,7</u> 0,7	<u>4,2</u> 4,2	<u>6,7</u> 6,4	<u>16,8</u> 16,4	<u>42,62</u> 42,07
5	Окуновое	6,95	8,7	2,1	6,1	1,3	19,5	14,3	8,9	60
6	Ледовое	<u>7,81</u> 7,18	<u>45,7</u> 73,3	<u>8,5</u> 12,1	<u>115,3</u> 127,1	<u>8,6</u> 11,1	<u>116,5</u> 286,0	<u>40,4</u> 14,7	<u>177,5</u> 171,0	<u>527,1</u> 697,6
7	Треугольное	<u>6,45</u> 6,11	<u>1,9</u> 2,3	<u>0,8</u> 0,9	<u>3,2</u> 3,2	<u>0,7</u> 0,7	<u>5,0</u> 8,7	<u>3,9</u> 3,3	<u>3,9</u> 4,1	<u>19,3</u> 23,3
8	Южное	<u>8,10</u> 7,90	<u>40,6</u> 42,3	<u>9,9</u> 10,0	<u>56,3</u> 57,2	<u>7,6</u> 8,1	<u>147,5</u> 155,4	<u>20,8</u> 23,6	<u>84,5</u> 88,7	<u>373,9</u> 382,2
9	Фон (Аннотированный..., 2010)	6,42	1,4	0,71	2,5	0,33	4,8	1,7	2,3	14

*Примечание.* Здесь и в табл. 6.2 в числителе указано значение в поверхностном слое, в знаменателе — в придонном. Если значение одно, то оно относится к поверхностному слою.

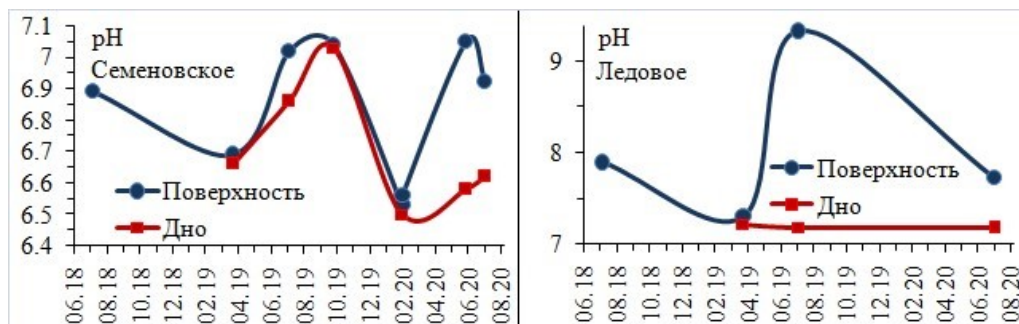


Рис. 6.1. Сезонное распределение величин рН в поверхностных и придонных слоях воды озер Семеновское и Ледовое в 2018–2020 гг.

К концу зимы рН увеличивается, потому что продукционные процессы начинаются при наличии ледяного покрова в солнечные дни, а также в случае увеличивающейся их продолжительности (Современные тенденции..., 2009). В условиях открытой воды с наступлением активного вегетационного периода происходит резкое увеличение рН воды до максимального значения 9,34 в июле 2019 г. в оз. Ледовое, что связано с потреблением большого количества  $\text{CO}_2$  и смещением значений рН в сторону щелочных (Никаноров, 2001). В этот период изменение рН зависит от содержания биогенных элементов и местных метеорологических условий, в основном от температуры и облачности (Современные тенденции..., 2009). Чем выше температура воды и меньше облачность, тем интенсивнее идет процесс образования первичной продукции, а следовательно, и повышения величины рН. В придонных слоях воды озер уровень рН воды снижается вследствие микробиологического разложения органического материала с выделением  $\text{CO}_2$  и сдвигом карбонатного равновесия в сторону образования  $\text{HCO}_3^-$  (Никаноров, 2001). В озерах г. Мурманска рост содержания  $\text{HCO}_3^-$  в придонном слое воды зафиксирован в нескольких водоемах (см. табл. 6.1), особенно явно он проявился в Ледовом и Треугольном (рис. 6.2). Наименьшие величины рН (слабокислые — по классификации О. А. Алекина) отмечены в озерах Большое и Треугольное, вода которых менее всего минерализована (см. табл. 6.1).

Максимальные значения минерализации воды, как и рН, зафиксированы в оз. Ледовое — до 735 мг/л. На втором месте по минерализации, впрочем, как и по величине рН, стоит оз. Южное: средний показатель — 374, диапазон — 140–400 мг/л. Минерализация воды в этих озерах в десятки раз превышает величины (среднее значение 14 мг/л, его можно принять за фоновое), отмеченные в озерах северо-восточной части Мурманской области водосбора Баренцева моря, которые приняты за фоновые (Аннотированный..., 2010). Довольно высокие показатели минерализации (в среднем 141 мг/л) обнаружены в воде оз. Среднее (см. табл. 6.1), наименьшие зафиксированы в озерах Большое и Треугольное (средние значения 42 и 21 мг/л соответственно), но и они также превышают фоновую минерализацию (см. табл. 6.1). Увеличение минерализации озер связано с повышенным поступлением солей в результате урбанизации территории их водосборов. В сезонной динамике минерализации отмечено увеличение значений в зимнее время и уменьшение в летнее (рис. 6.3).

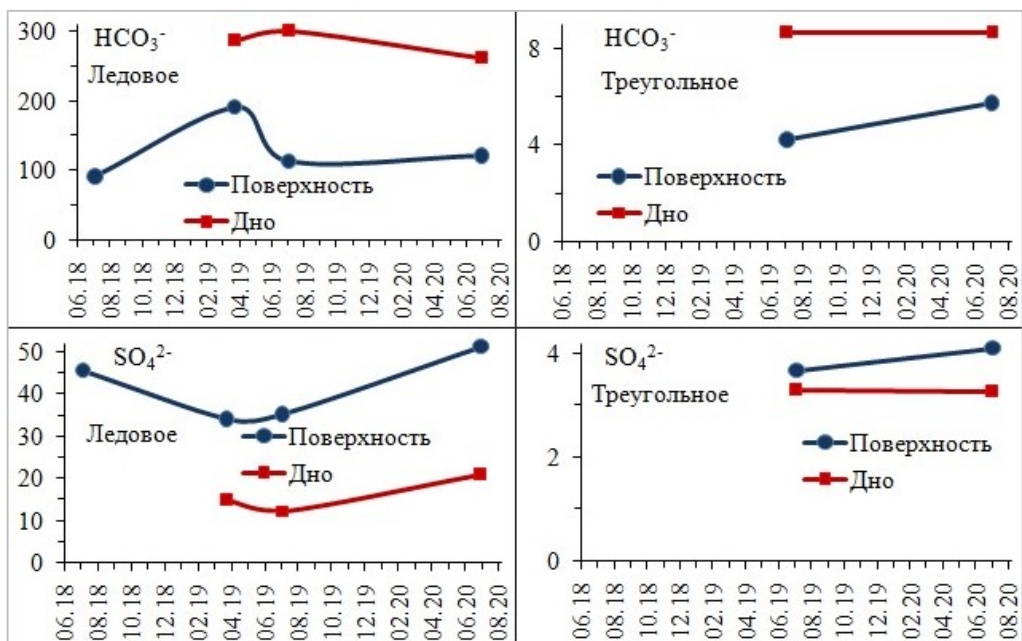


Рис. 6.2. Сезонное распределение содержания  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в поверхностных и придонных слоях воды озер Ледовое и Треугольное в 2018–2020 гг.

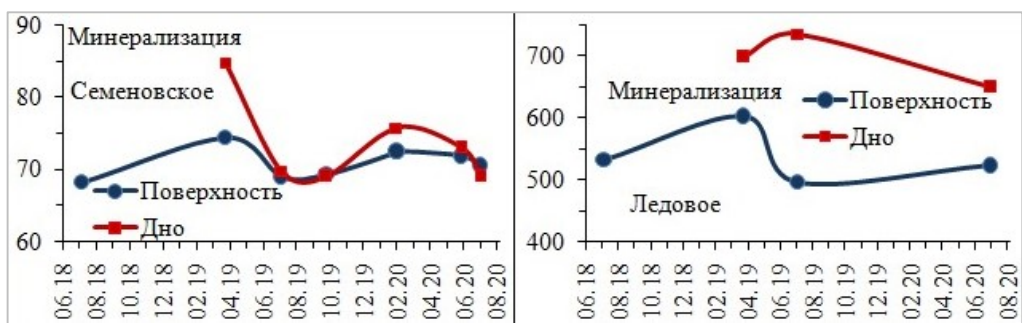


Рис. 6.3. Сезонное распределение минерализации (мг/л) в поверхностных и придонных слоях воды озер Семеновское и Ледовое в 2018–2020 гг.

Увеличение минерализации в зимнее время связано с сезонными особенностями питания водоемов: основным источником питания в это время служат подземные воды с повышенной минерализацией, а в летнее время основным источником является поступление атмосферных осадков. Минерализация в придонном слое воды озер, как правило, больше, чем в поверхностном, что, вероятно, связано с повышенным притоком минеральных веществ из донных отложений после микробиологического разложения органического вещества.

Воды озер Северное, Семеновское, Большое и Ледовое, по классификации О. А. Алекина (1970), относятся к хлоридному классу и натриевой группе, оз. Окунево — к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе (распределение

главных ионов типично для основной массы озер Мурманской области), озер Треугольное и Южное — к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу и натриевой группе, а оз. Среднее — к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу и кальциевой группе (рис. 6.4). Таким образом, кальциевая группа отмечена только в двух из исследованных восьми озер — Окуновом и Среднем, в остальных — натриевая. Хлоридный класс четко проявляется в трех озерах — Северном, Семеновском и Большом, гидрокарбонатный — в Окуновом, для оз. Южное характерен гидрокарбонатно-хлоридный класс. В озерах Ледовое и Треугольное зафиксирована смена преобладающего аниона в толще воды: в поверхностном слое вод обоих озер преобладает  $\text{Cl}^-$ , в придонном слое оз. Треугольное доминирует анион  $\text{HCO}_3^-$ , а в оз. Ледовое  $\text{Cl}^-$  и  $\text{HCO}_3^-$  находятся примерно в одинаковых количествах (рис. 6.5).

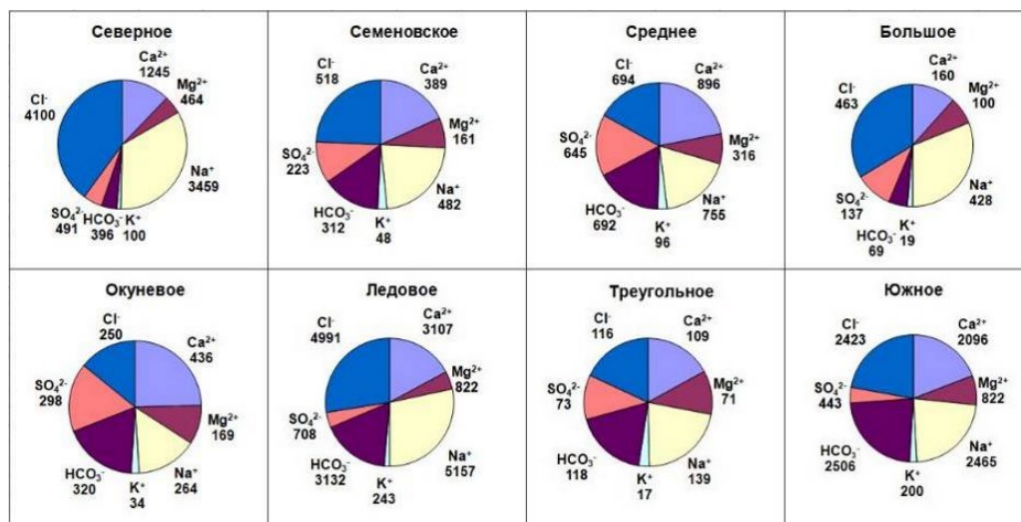


Рис. 6.4. Эквивалентные концентрации (мкг-экв/л) главных ионов воды озер г. Мурманска

В этих озерах (Ледовое и Треугольное) отмечено также снижение аниона  $\text{SO}_4^{2-}$  в придонном слое, что может быть связано с восстановительной обстановкой в данном слое (рис. 6.2), в которой происходит восстановление серы со степени окисления +6 до -2 и преобразование сульфат-иона в сульфид-ион (David, Mitchell 1985; Миграция..., 1999). Это приводит к уменьшению содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  в придонном слое и к выпадению в донные отложения сульфидов металлов, в первую очередь Fe и Mn и других, чутко реагирующих на изменение геохимической обстановки в толще воды и донных отложений (Даувальтер, Ильяшук, 2007; Даувальтер, 2020).

Увеличение содержания главных катионов щелочных и щелочноземельных металлов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ ), а также главных анионов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) связано с влиянием городской среды, в том числе с использованием реагентов для противогололедной обработки городских дорог. Например, на территории Юго-Западного административного округа Москвы установлено высокое

содержание ионов  $\text{Cl}^-$  (до 9000 мг/л),  $\text{Na}^+$  (до 6000 г/л),  $\text{Ca}^{2+}$  (до 1000 г/л),  $\text{K}^+$  (до 29 мг/л),  $\text{Mg}^{2+}$  (до 6,2 мг/л) в снеговой воде, отобранной вблизи дорог, на которых используются противогололедные реагенты (Дрябжинский и др., 2017).

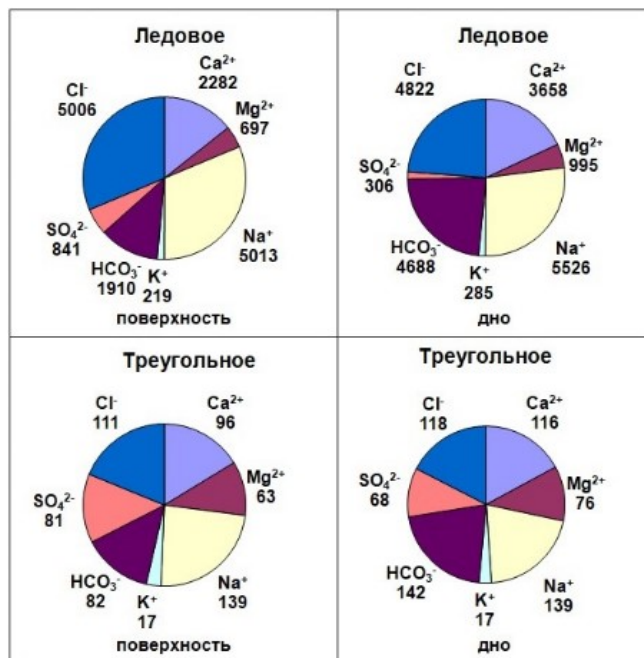


Рис. 6.5. Эквивалентные концентрации (мкг-экв/л) главных ионов в поверхностном и придонном слоях воды озер Ледовое и Треугольное

Значительное количество загрязняющих веществ и соединений поступает в городские водные объекты при выщелачивании фундаментов зданий и сооружений подземными водами, приобретающими агрессивность на урбанизированных территориях, при разрушении городских дорог, зданий и сооружений, в результате работы автотранспорта (пыль, выхлопные газы, стирание шин, тормозных колодок) и т. д. (Геохимия..., 2013).

**Содержание биогенных элементов и органических соединений.** В воде оз. Ледовое зафиксировано максимальное содержание соединений азотной группы (аммоний-иона и общего азота) (табл. 6.2), что, вероятно, связано, во-первых, с поступлением воды из оз. Карьерное, где проводились буровзрывные работы с использованием азотсодержащих взрывчатых веществ для добычи скальных горных пород, а во-вторых, с поступлением сточных вод с городской территории, содержащих азотные соединения в повышенных концентрациях, и с разложением нефтепродуктов, в большом количестве захороненных в донных отложениях озера. Разработка месторождения гнейсов началось в 1954 г. В 1970-х гг. карьер закрыли, и из него перестали откачивать воду, что и привело к образованию оз. Карьерное. Высокое содержание аммония на фоне относительно низкого содержания нитратов, возможно, свидетельствует о поступлении в воду органических соединений, а минеральные продукты трансформации взрывчатых веществ, скорее всего, имеют второстепенное значение.

Таблица 6.2

Медианные значения содержания биогенных элементов и органических веществ озер г. Мурманска и восточной части Мурманской области (Аннотированный..., 2010)

№ п/п	Озера	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	P <sub>общ</sub>	Цветность	XПК	C <sub>орг</sub>	Si
		мкгN/л			мкгP/л		Pt°	мг/л		
1	Северное	16,0	9,5	407	3,5	17,5	28,0	6,32	6,38	1,58
2	Семеновское	<u>25,0</u>	<u>12,0</u>	<u>454,5</u>	<u>1,5</u>	<u>22,0</u>	<u>12,5</u>	<u>4,84</u>	<u>5,25</u>	<u>0,28</u>
		97,5	27,5	467,5	4,0	28,0	13,0	4,46	4,96	0,50
3	Среднее	<u>27,0</u>	<u>0,5</u>	<u>360</u>	<u>0,5</u>	<u>12,0</u>	<u>7,5</u>	<u>3,48</u>	<u>4,21</u>	<u>0,07</u>
		42,0	96,0	308	1,0	13,0	9,0	3,38	4,13	0,31
4	Большое	<u>14,5</u>	<u>0,5</u>	<u>155,5</u>	<u>2,5</u>	<u>8,0</u>	<u>29,5</u>	<u>6,00</u>	<u>6,13</u>	<u>1,39</u>
		9,0	0,0	150,0	4,0	8,0	30,0	5,73	5,90	1,34
5	Окуневое	11	1	258	2	15	55	9,88	9,10	0,97
6	Ледовое	<u>676</u>	<u>2,5</u>	<u>1565</u>	<u>22,5</u>	<u>85</u>	<u>23,5</u>	<u>6,56</u>	<u>6,56</u>	<u>1,22</u>
		5866	1,0	5803	65,0	914	34,0	9,70	8,96	7,76
7	Треугольное	<u>34,5</u>	<u>1,0</u>	341,0	<u>1,5</u>	<u>16,5</u>	<u>53,5</u>	<u>9,72</u>	<u>8,98</u>	<u>1,66</u>
		41,5	3,0	320,5	2,5	33,5	37,0	10,78	9,79	2,47
8	Южное	<u>34,5</u>	<u>1,0</u>	282	<u>1,5</u>	<u>17,5</u>	<u>12</u>	<u>5,2</u>	<u>5,55</u>	<u>0,23</u>
		37,5	0,0	253	5,5	22,0	14	6,1	6,20	0,32
9	Фон (Кашулин и др., 2010)	12	2	248	0,75	8	64	8,47	8,02	1,49

В донных отложениях оз. Ледовое в 2021 г. отмечено самое высокое содержание нефтепродуктов из всех исследуемых озер — 2,7 %, что связано с поступлением нефтепродуктов из многочисленных автомастерских и заправок, расположенных на водосборе озера. Известно, что азот в нефти и нефтепродуктах содержится в количестве десятых долей процента (Большаков, 1988).

Содержание  $\text{NH}_4^+$  в придонном слое воды оз. Ледовое в пересчете на эквивалентную концентрацию превышает концентрацию главных ионов  $\text{K}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Максимальное содержание  $\text{NH}_4^+$  в оз. Ледовое (6390 мкгN/л в придонных слоях на глубине 13 м) более чем в 300 раз превышает среднее содержание этого иона (20 мкгN/л) в фоновых озерах (Аннотированный..., 2010). Высокие концентрации  $\text{NH}_4^+$  в воде оз. Ледовое говорят о сильном загрязнении (Никаноров, 2001). В других озерах аммоний-ион присутствует в значительно меньшем количестве, но оно больше среднего содержания в озерах водосбора Баренцева моря, за исключением озер Окуневое и Большое.

Содержание нитрат-иона в воде оз. Ледовое на три порядка меньше, за исключением аномально высокого значения в июле 2020 г. (табл. 6.2, рис. 6.6), чем аммоний-иона, что говорит о присутствии восстановительной обстановки и развитии процессов гниения растительных остатков и органических веществ (Никаноров, 2001). Подобная закономерность (превышение содержания аммоний-иона над нитрат-ионом) отмечена также в других мурманских озерах (исключение оз. Среднее), что иллюстрирует развитие восстановительной обстановки в придонных слоях этих озер. Во время исследований озер Ледовое, Семеновское и Южное, в частности при отборе проб донных отложений, ощущался запах сероводорода, что напрямую говорит о дефиците кислорода и наличии восстановительной обстановки в донных отложениях и придонных слоях воды. Замеры величин Eh в воде мурманских озер показали, что в придонном слое происходит значительное снижение окислительно-восстановительного потенциала по сравнению с поверхностным слоем, за исключением оз. Среднее, где зафиксировано увеличение величины Eh в придонном слое. Вероятно, поэтому там содержание  $\text{NO}_3^-$  превышает  $\text{NH}_4^+$ , потому что в окислительной обстановке происходит окисление азота до образования иона со степенью окисления +5, т. е. нитрат-иона  $\text{NO}_3^-$  (рис. 6.6). Снижение содержания соединений азотной группы в летнее время и увеличение в зимнее (рис. 6.6) связано с их потреблением фитопланктоном в период вегетации.

Максимальное содержание соединений фосфора (фосфат-иона и общего фосфора в фильтрованной и нефилтрованной воде), как и соединений азота, отмечено в воде оз. Ледовое (табл. 6.2, рис. 6.7), что связано с поступлением сточных вод с городской территории, содержащих соединения этого элемента. Содержание  $\text{PO}_4^{3-}$  в придонных слоях (глубина 13 м) этого озера доходит до 136 мкгP/л,  $P_{\text{общ}}$  — до 1677 мкгP/л, что на два порядка больше, чем среднее содержание этих компонентов (0,75 и 8,0 мкгP/л соответственно) в фоновых озерах (Аннотированный..., 2010).

Превышение содержания соединений фосфора над фоновыми значениями зафиксировано во всех озерах г. Мурманска (см. табл. 6.2).



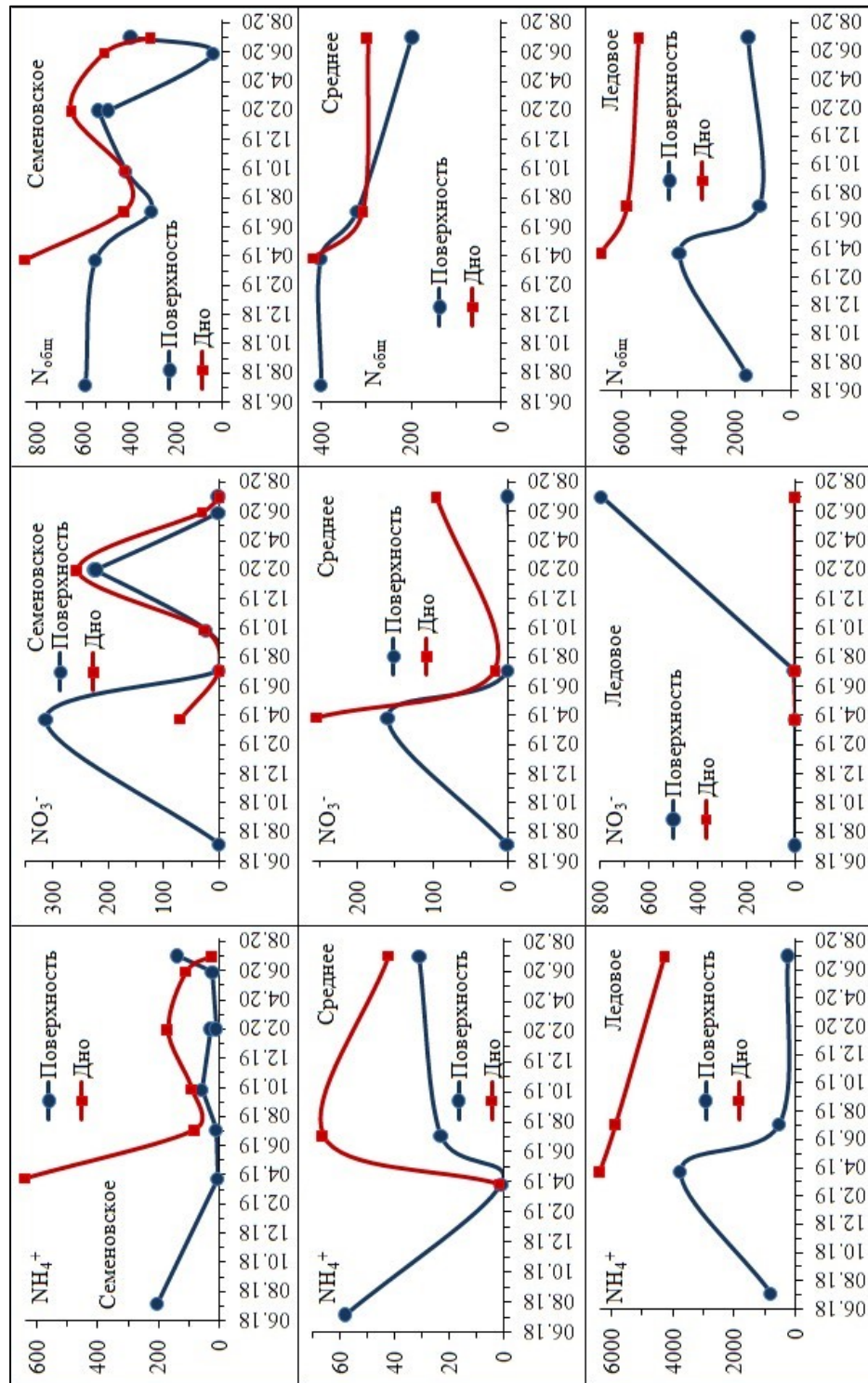


Рис. 6.6. Содержание соединений азотной группы ( $\text{mgN/l}$ ) в воде озер г. Мурманска

В поверхностном слое воды всех озер г. Мурманска отмечено снижение содержания соединений фосфора по сравнению с придонным слоем (рис. 6.7), что связано с их потреблением (особенно фосфатов) фитопланктоном в поверхностном слое в период вегетации в летнее время, а также с осаждением взвешенных (главным образом органического происхождения) частиц, содержащих повышенное количество соединений фосфора, что увеличивает их концентрацию в придонном слое. Как и для соединений азотной группы, отмечено снижение содержания соединений фосфора в летнее время и его рост в зимнее (рис. 6.7), что связано с их потреблением фитопланктоном в период вегетации.

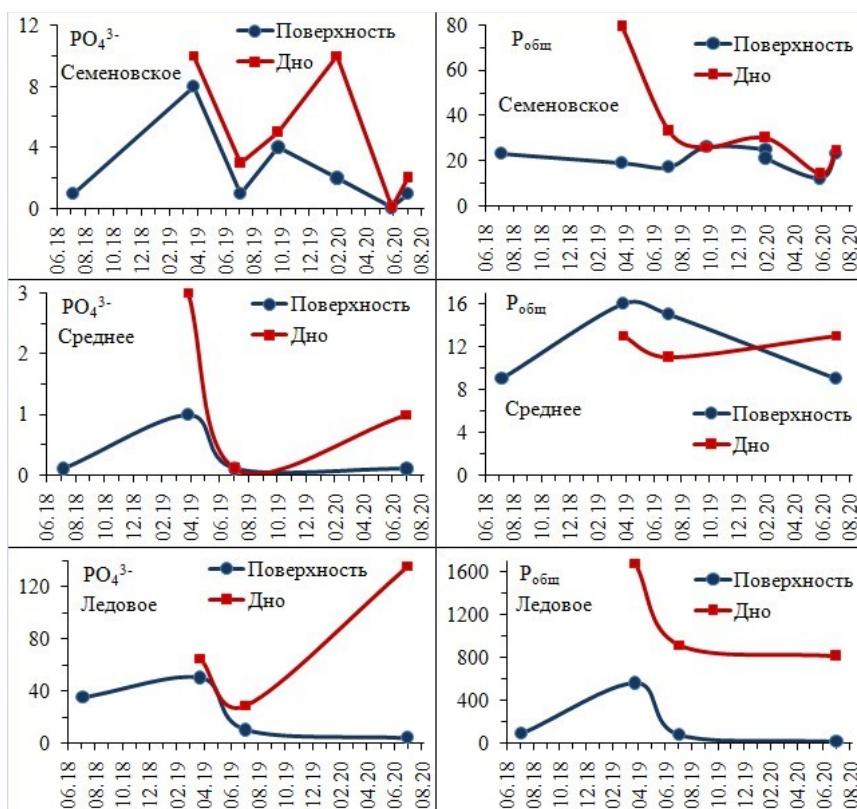


Рис. 6.7. Содержание соединений фосфора (мкгР/л) в воде озер г. Мурманска

В содержании кремния, который потребляется диатомовыми водорослями для образования створок, происходят изменения, подобные описанным ранее для других биогенных элементов. Концентрации Si в период ледового покрова достигают наибольших значений, а с наступлением вегетационного периода происходит их резкое снижение (рис. 6.8).

Как и для других биогенных элементов (соединений азота и фосфора), отмечено увеличение содержания Si в придонном слое воды исследуемых озер по сравнению с поверхностным слоем (см. табл. 6.2, рис. 6.8), особенно в период вегетации, когда кремний интенсивно поглощается диатомовыми водорослями. Содержание Si в оз. Треугольное превышает медианные значения в фоновых озерах так же, как и в придонном слое оз. Ледовое, а в оз. Северное оно примерно равно фоновому значению (см. табл. 6.2).

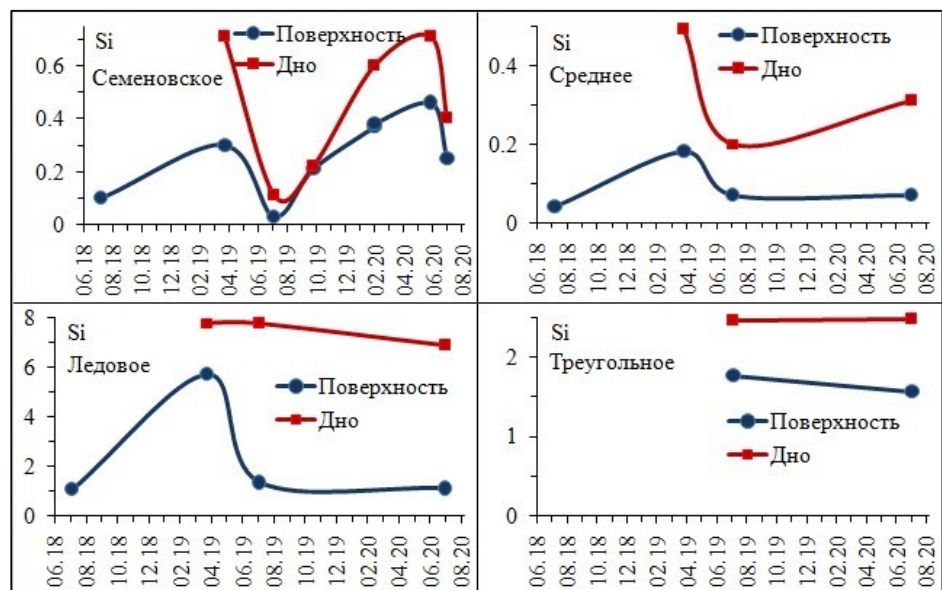


Рис. 6.8. Содержание кремния (мг/л) в воде озер г. Мурманска

Содержание органических веществ в воде исследуемых городских озер, как правило, меньше (за исключением озер Окуновое и Треугольное, а также в придонном слое оз. Ледовое), чем средние показатели в фоновых озерах (Аннотированный..., 2010), то есть 64 Pt°, 8,5 мг/л и 8,0 мкг/л — для цветности, ХПК и  $C_{орг}$  соответственно (табл. 6.2). Невысокое содержание органического материала связано с тем, что водные массы исследуемых озер г. Мурманска формируются за счет поверхностного стока с городской территории, в меньшей степени покрытой почвенно-растительным слоем по сравнению с природными условиями, что уменьшает поступление аллохтонного органического материала.

В пользу этого предположения говорит следующий факт: медианные значения показателей содержания органического материала, сопоставимые с вышеперечисленными средними показателями озер водосбора Баренцева моря, обнаружены в озерах Окуновое и Треугольное, наименее подверженных загрязнению и водосбор которых частично находится в лесной зоне. Содержание органических соединений в оз. Семеновское в зимние месяцы, как правило, выше в придонном слое воды, в период вегетации — больше в поверхностном слое, в оз. Среднее — выше в поверхностном слое, в оз. Ледовое — в придонном (рис. 6.9), т. е. одинаковой закономерности в распределении органических соединений в водной толще исследованных озер г. Мурманска не обнаружено.

Как и для других биогенных элементов (соединений азота и фосфора), отмечено увеличение содержания Si в придонном слое воды исследуемых озер по сравнению с поверхностным слоем (см. табл. 6.2, рис. 6.8), особенно в период вегетации, когда кремний интенсивно поглощается диатомовыми водорослями. Содержание Si в оз. Треугольное превышает медианные значения в фоновых озерах так же, как и в придонном слое оз. Ледовое, а в оз. Северное примерно равно фоновому значению (см. табл. 6.2).

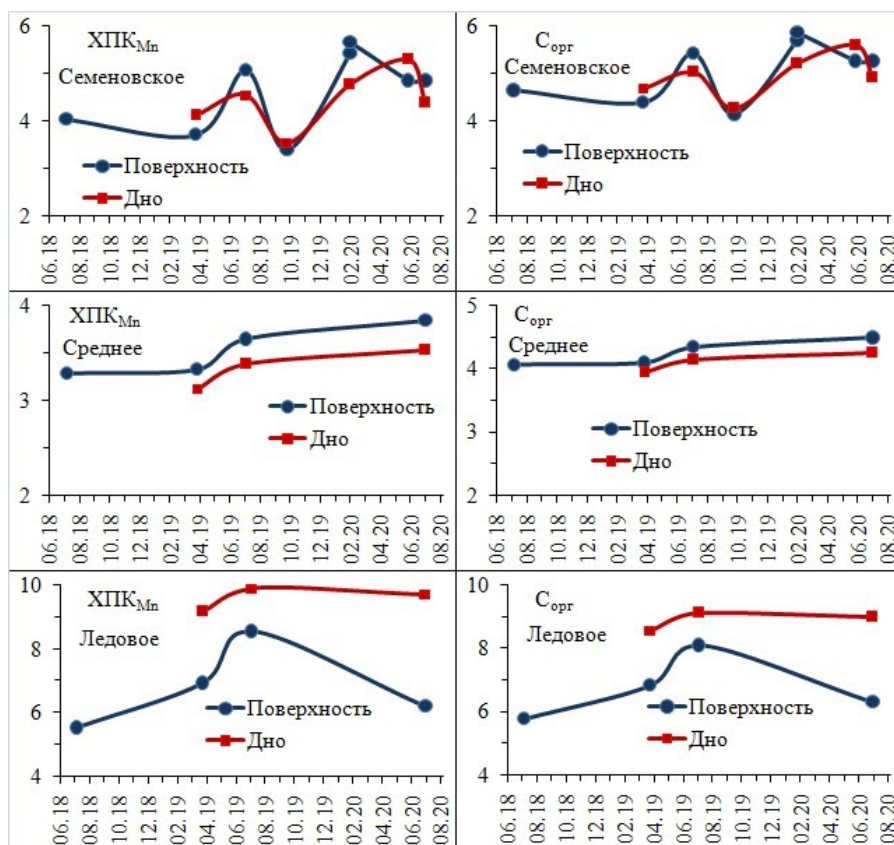


Рис. 6.9. Содержание органических соединений (мг/л) в воде озер г. Мурманска

**Содержание микроэлементов.** Характерной особенностью химического состава поверхностных вод Арктической зоны и Севера России являются повышенные концентрации Fe, Al, Mn вследствие гумификации водосборов (Осцигенсе..., 2013). В воде оз. Ледовое зафиксировано наибольшее содержание Fe (более 6000 мкг/л в придонном слое) (табл. 6.3, рис. 6.10), как и максимальное содержание органического материала в придонном слое воды (см. табл. 6.2), что может свидетельствовать о преобладающем нахождении Fe в составе коллоидных органических соединений (Никаноров, 2001).

Железо является биологически активным элементом и может поступать в воду после химического выветривания подстилающих горных пород, разложения органических остатков, а также с промышленными и хозяйственно-бытовыми стоками (Даувальтер, 2020). Высокое содержание Fe отмечено в воде озер Окуновое, Треугольное и Семеновское, особенно в придонных слоях двух последних озер, в которых зафиксировано довольно высокое содержание органического материала. Наименьшие концентрации Fe наблюдаются в озерах, характеризующихся незначительным содержанием органического материала, — Среднее и Южное. В пользу того, что Fe находится главным образом в составе органоминеральных соединений, говорит высокий коэффициент корреляции ( $r = 0,80$  при  $p < 0,01$ ) между концентрациями Fe и ХПК (один из показателей содержания органического материала). Вода оз. Южное характеризуется самыми высокими значениями pH, при которых растворимость железа резко уменьшается.

Медианные значения концентраций (мкг/л) микроэлементов в воде озер Мурманска и северо-восточной части водосбора Баренцева моря (БМ — Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (СФ — Heavy Metal..., 2001)

Элемент	Северное	Семеновское	Среднее	Окуновое	Ледовое	Треугольное	Южное	БМ	СФ
Li	1,51	$\frac{0,70}{0,66}$	$\frac{1,11}{1,00}$	0,99	$\frac{3,76}{5,60}$	$\frac{0,56}{0,48}$	$\frac{1,93}{1,81}$	0,72	0,17
Be	0,005	$\frac{0,006}{0,001}$	$\frac{<0,001}{0,002}$	0,007	$\frac{0,004}{0,008}$	$\frac{0,004}{0,005}$	$\frac{<0,001}{<0,001}$	0,82	<0,01
B	14,9	$\frac{8,01}{7,80}$	$\frac{17,4}{14,7}$	11,0	$\frac{39,9}{67,0}$	$\frac{3,45}{3,11}$	$\frac{54,2}{52,8}$	1,74	1,41
Al	69	$\frac{11,8}{12,9}$	$\frac{23,8}{12,4}$	102	$\frac{83}{237}$	$\frac{103}{123}$	$\frac{12,3}{9,6}$	31	
Ti	0,98	$\frac{0,42}{0,70}$	$\frac{0,48}{0,41}$	1,55	$\frac{6,44}{9,08}$	$\frac{1,35}{2,18}$	$\frac{0,45}{0,63}$	1,85	4,86
V	2,93	$\frac{3,87}{1,60}$	$\frac{14,7}{1,94}$	2,23	$\frac{5,99}{12,5}$	$\frac{1,50}{3,20}$	$\frac{1,01}{0,83}$	0,67	< 0,3
Cr	0,69	$\frac{0,46}{0,37}$	$\frac{0,58}{0,52}$	0,97	$\frac{1,22}{2,06}$	$\frac{0,77}{0,84}$	$\frac{0,67}{0,72}$	0,50	< 0,1
Mn	19,5	$\frac{12,1}{120}$	$\frac{4,47}{83,5}$	7,4	$\frac{200}{543}$	$\frac{14,1}{418}$	$\frac{40,2}{12,1}$	2,09	3,43
Fe	171	$\frac{79}{356}$	$\frac{37,4}{39,0}$	392	$\frac{273}{5236}$	$\frac{668}{3353}$	$\frac{56,8}{40,9}$	47	61
Co	0,28	$\frac{0,05}{0,22}$	$\frac{0,081}{0,133}$	0,15	$\frac{1,58}{1,20}$	$\frac{0,067}{1,19}$	$\frac{0,10}{0,11}$	0,47	0,05
Ni	5,57	$\frac{4,20}{3,92}$	$\frac{8,37}{5,19}$	5,09	$\frac{15,8}{7,63}$	$\frac{2,24}{12,0}$	$\frac{2,49}{3,29}$	1,06	0,33
Cu	2,11	$\frac{1,73}{1,49}$	$\frac{2,48}{1,55}$	2,31	$\frac{3,61}{1,64}$	$\frac{1,94}{3,01}$	$\frac{1,23}{1,52}$	0,94	0,41
Zn	11,4	$\frac{5,72}{5,09}$	$\frac{9,22}{4,73}$	11,0	$\frac{12,7}{8,14}$	$\frac{3,97}{7,27}$	$\frac{1,72}{1,50}$	1,66	1,70
Rb	5,18	$\frac{2,89}{2,82}$	$\frac{5,69}{5,01}$	2,43	$\frac{8,15}{9,55}$	$\frac{1,73}{1,95}$	$\frac{5,16}{5,36}$	1,07	0,49

Элемент	Северное	Семеновское	Среднее	Окуневое	Ледовое	Треугольное	Южное	БМ	СФ
Sr	135	$\frac{62}{65}$	$\frac{122}{114}$	66,2	$\frac{296}{470}$	$\frac{20,5}{21,9}$	$\frac{224}{226}$	7,6	5,91
Zr	0,036	$\frac{0,136}{0,207}$	$\frac{0,0168}{0,0295}$	0,0415	$\frac{0,090}{0,487}$	$\frac{0,099}{0,081}$	$\frac{0,582}{0,003}$	0,46	–
Nb	0,096	$\frac{0,0044}{0,0075}$	$\frac{<0,001}{<0,001}$	0,0027	$\frac{0,016}{0,183}$	$\frac{0,0031}{0,0042}$	$\frac{0,0126}{0,0103}$	–	–
Mo	0,69	$\frac{0,11}{0,10}$	$\frac{0,30}{0,20}$	0,12	$\frac{0,53}{0,29}$	$\frac{0,007}{0,026}$	$\frac{0,32}{0,32}$	0,55	< 0,04
Cd	0,026	$\frac{0,015}{0,009}$	$\frac{0,093}{0,019}$	0,023	$\frac{0,019}{0,012}$	$\frac{0,011}{0,024}$	$\frac{0,018}{0,007}$	0,36	< 0,02
Sn	0,009	$\frac{0,008}{0,005}$	$\frac{0,037}{0,037}$	0,037	$\frac{0,039}{0,080}$	$\frac{0,036}{0,014}$	$\frac{0,006}{0,002}$	0,50	–
Sb	0,15	$\frac{0,13}{0,10}$	$\frac{0,41}{0,26}$	0,25	$\frac{0,192}{0,110}$	$\frac{0,063}{0,055}$	$\frac{0,156}{0,165}$	0,69	0,03
Cs	0,120	$\frac{0,184}{0,110}$	$\frac{0,114}{0,069}$	0,064	$\frac{0,056}{1,094}$	$\frac{0,071}{0,495}$	$\frac{0,938}{0,727}$	2,19	–
Ba	48,8	$\frac{20,7}{24,2}$	$\frac{21,5}{21,0}$	21,1	$\frac{68,6}{113}$	$\frac{9,73}{13,5}$	$\frac{73}{75}$	5,08	3,08
Ta	<0,001	$\frac{0,0014}{0,0006}$	$\frac{<0,001}{<0,001}$	<0,001	$\frac{<0,001}{0,0021}$	$\frac{<0,001}{<0,001}$	$\frac{0,183}{<0,001}$	–	–
W	0,062	$\frac{0,006}{0,007}$	$\frac{0,013}{0,013}$	0,025	$\frac{0,96}{1,83}$	$\frac{0,004}{0,007}$	$\frac{0,020}{0,021}$	0,61	–
Tl	0,0070	$\frac{0,0038}{0,0034}$	$\frac{0,0037}{0,0026}$	0,0039	$\frac{0,0087}{0,0058}$	$\frac{0,0035}{0,0036}$	$\frac{0,0019}{0,0012}$	–	–
Pb	0,22	$\frac{0,091}{0,170}$	$\frac{0,192}{0,049}$	0,40	$\frac{0,32}{0,23}$	$\frac{0,214}{0,532}$	$\frac{0,074}{0,061}$	0,47	0,18
Bi	0,0086	$\frac{0,0041}{0,0019}$	$\frac{0,0061}{0,0071}$	0,0033	$\frac{0,0118}{0,0159}$	$\frac{0,0076}{0,0114}$	$\frac{0,0052}{0,0011}$	1,06	–
Th	0,0016	$\frac{<0,0005}{0,0016}$	$\frac{<0,0005}{<0,0005}$	0,0024	$\frac{0,0173}{0,0416}$	$\frac{0,0158}{0,0215}$	<0,0005	–	–
U	1,50	$\frac{0,004}{0,005}$	$\frac{0,020}{0,015}$	0,029	$\frac{0,26}{0,40}$	$\frac{0,005}{0,011}$	$\frac{0,105}{0,161}$	1,01	0,041

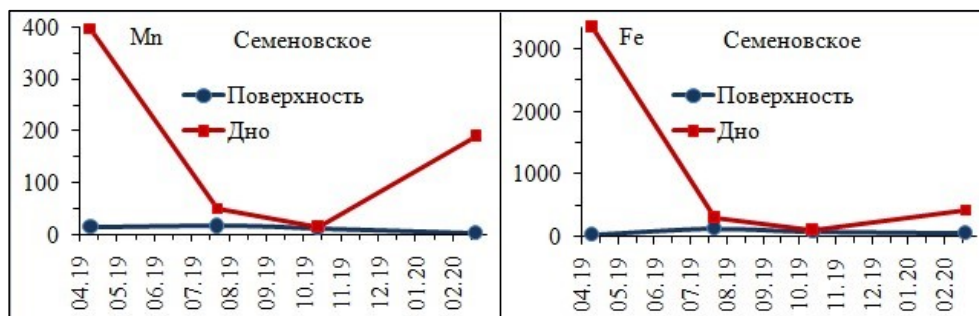


Рис. 6.10. Сезонное распределение содержания марганца и железа (мкг/л) в поверхностных и придонных слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

Например, известно, что растворимость гидроксида трехвалентного железа при увеличении pH с 6 до 8 уменьшается на четыре порядка (Беус и др., 1976). При поступлении вод поверхностного стока в озеро со слабощелочными и щелочными условиями (значения pH находятся в пределах от 7,8 до 9,1) происходит выпадение в осадок гидроксида Fe(III) и поступление их в донные отложения (Даувальтер, Ильяшук, 2007; Даувальтер, 2020). В большей части исследуемых городских озер (за исключением озер Среднее и Южное) содержание Fe выше, чем среднее содержание в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (Heavy Metal..., 2001).

Главными поставщиками железа в озера Мурманской области являются поверхностный сток и болотные воды, а также горные породы, в которых железо содержится в основном в двухвалентной форме. В процессе разрушения силикатов под действием угольной кислоты и воды двухвалентное железо переходит в виде бикарбонатов в озерные воды. В дальнейшем под воздействием кислорода, растворенного в воде, оно переходит в трехвалентное, которое в кислых растворах гидролитически расщепляется до гидратов окиси железа (Романовская, 2005). Помимо этого, железо обладает большой способностью к комплексообразованию, создавая с гумусовыми веществами устойчивые комплексные соединения (большая часть железа находится в комплексной анионной форме) (Аналитические..., 2017).

Наибольшее содержание марганца зафиксировано в оз. Ледовое (см. табл. 6.3), высокое содержание отмечается в озерах Треугольное, Семеновское и Среднее, и во всех вышеперечисленных озерах его содержание в придонном слое больше, чем в поверхностном (рис. 6.10). При значениях pH, характерных для поверхностных вод, окисление марганца протекает довольно медленно (Никаноров, 2001). В связи с этим при попадании в водоемы  $Fe^{2+}$  и  $Mn^{2+}$  сначала идет окисление и осаждение железа и лишь потом марганца. В то же время восстановление окисленных форм Mn в донных отложениях водоемов протекает легче, чем восстановление Fe (Никаноров, 2001; Даувальтер, Ильяшук, 2007; Даувальтер, 2020). Во всех исследуемых городских озерах содержание Mn, как и Fe, выше, чем среднее содержание в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (Heavy Metal..., 2001).

Для природных водоемов характерно наличие железомарганцевого цикла (Mortimer, 1942; Даувальтер, Ильяшук, 2007). Республика Карелия и Мурманская область относятся к железомарганцевой геохимической провинции, что

обуславливает миграцию данных элементов в составе органоминеральных комплексов в водные объекты региона (Белкина, 2021). На их совместное поступление указывает сильная корреляционная зависимость между содержанием железа и марганца в исследуемых озерах (рис. 6.11). Помимо этого, для территорий Субарктики характерно заболачивание озер с высоким содержанием гумуса (Даувальтер, Ильяшук, 2007). В результате воздействия низких температур и уменьшения количества кислорода на дне водоемов образуются восстановительные условия, приводящие к переходу марганца в растворенную форму ( $Mn^{2+}$ ) и его выходу из донных осадков (Горленко и др., 1977). К одному из источников антропогенного марганца относятся выхлопные газы автотранспорта, работающего на бензине, в котором в качестве антидетоционной присадки используется метилциклопентадиенил марганец трикарбонил и марганецсодержащие противодымные присадки для дизельного топлива (Распределение..., 2013).

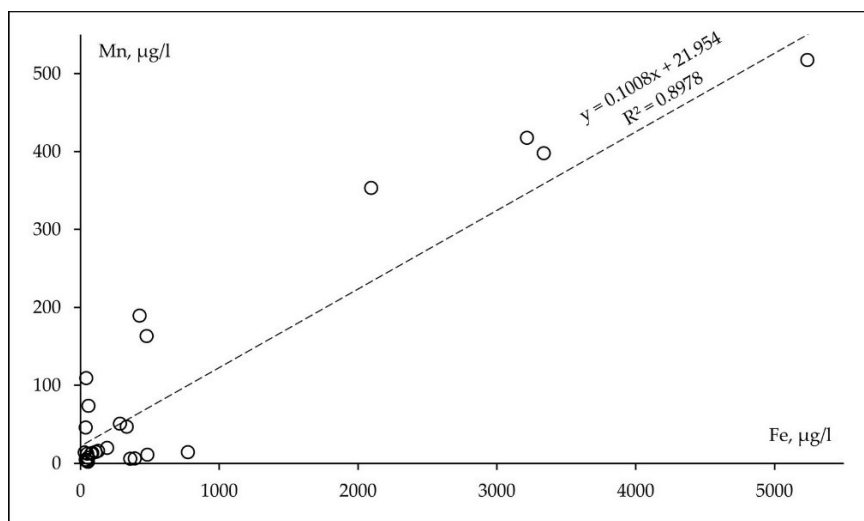


Рис. 6.11. Зависимость концентрации железа от уровня содержания марганца в исследуемых озерах

В основном наибольшие концентрации Fe и Mn в придонном слое воды отмечаются в зимне-весенний период и достигают максимального уровня в конце зимы перед половодьем, когда в придонном слое воды отмечается большой дефицит кислорода, и в восстановительной обстановке Fe и Mn переходят в растворимую двухвалентную форму, т. е. в период зимней стагнации происходит активная диффузия  $Fe^{2+}$  и  $Mn^{2+}$  из донных отложений в воду, что приводит к увеличению содержания данных элементов в придонных горизонтах. Концентрации исследуемых элементов значительно снижаются летом (по сравнению с зимним периодом), так как в это время в условиях хорошего снабжения кислородом образуется окислительная обстановка, что ведет к окислению  $Fe^{2+}$  до гидроксидов  $Fe^{3+}$ , а  $Mn^{2+}$  — до диоксида, происходит выпадение этих малорастворимых форм в осадок и концентрация данных элементов в водоеме снижается. Осенью, во период гомотермии, происходит перемешивание водных масс, что приводит к равномерному распределению элементов в водной толще озера. Концентрации Fe и Mn же в поверхностном слое в течение года остаются



примерно на одинаковом уровне, при этом в придонном слое летом они снижаются более чем на порядок по сравнению с зимним периодом (рис. 6.10).

В глобальном масштабе главным источником выбросов тяжелых металлов остается стационарное сжигание ископаемого топлива (Расуна, Расуна, 2001). К числу глобальных загрязняющих элементов относятся высокотоксичные халькофильные элементы — Pb, As, Cd, Hg, а также другие металлы, поступающие в окружающую среду при сжигании топлива и при переработке на горно-металлургических предприятиях.

Главным источником выбросов ванадия и никеля — до 100 и 90 % соответственно — является сжигание нефти и мазута. Известно, что V и Ni содержатся в мазуте и выбросы ТЭЦ, источником энергии на которых является мазут, могут загрязнять городские территории (Vanadium..., 1988; Hernandez, Rodriguez, 2002). Такие выбросы с начала 1980-х до середины 1990-х гг. выросли в 2–3 раза, потому что большинство электростанций, сжигающих нефть и мазут, не оборудовано фильтрами для удаления частиц, содержащих Ni и V, при этом производство по этой технологии электроэнергии за это время выросло в два раза (Расуна, Расуна, 2001).

Деятельность предприятий теплоэнергетики, работающих на мазутном топливе (Мурманская ТЭЦ, котельные) является существенным фактором увеличения содержания ванадия в воде городских озер Мурманска. Его концентрации в воде исследуемых озер колеблются в пределах от 0,75 до 27 мкг/л, больше всего они были в воде оз. Среднее (табл. 6.3), ближе всех расположенного к Мурманской ТЭЦ, на которой в качестве топлива используется мазут. Высокие концентрации V наблюдаются в водах озер Ледовое (до 13 мкг/л), Окуновое (до 11 мкг/л) и Семеновское (до 6,4 мкг/л) (рис. 6.12). По мере удаления от источников поступление данного элемента в озера снижается, хотя превышение фоновых концентраций региона в 3–4 раза отмечается и в более отдаленных озерах (Северное и Треугольное). Во многом это связано с тем, что дальность разноса зольных частиц мазутных ТЭЦ может достигать 15 км от источника (Сагет и др., 1990).

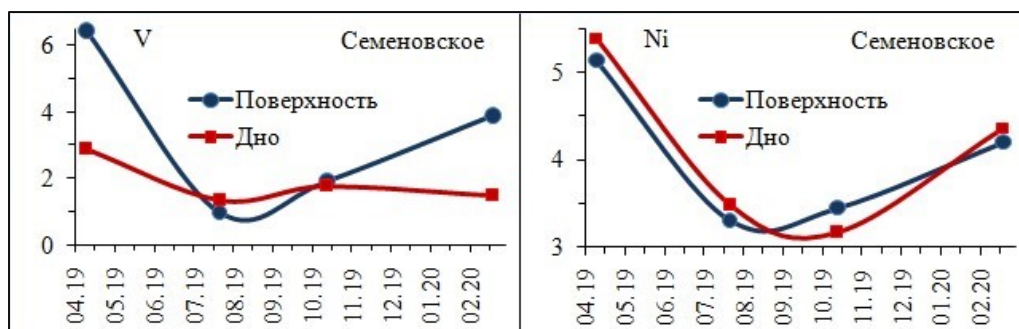


Рис. 6.12. Сезонное распределение содержания ванадия и никеля (мкг/л) в поверхностных и придонных слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

В зимнее время содержание ванадия повышается (рис. 6.12), как это было отмечено для Fe и Mn, однако, в отличие от последних, данный процесс происходит в поверхностном слое воды оз. Семеновское, что говорит в первую

очередь о том, что ванадий попадает с поверхностным стоком, в том числе и в зимний период, вероятно, за счет поступления воды из ручьев, впадающих в озеро. В летнее время его содержание в толще воды выравнивается, хотя в придонном слое оно немного выше, а осенью, в период наступления гомотермии и при смешении вод по всей толще, в придонном и поверхностном слоях оно выравнивается (см. рис. 6.12).

Никель является главным сидерофильным элементом Балтийского кристаллического щита (Янин и др., 2016), его фоновое содержание составляет чуть более 1 мкг/л (Базова, 2017). В воде исследуемых озер концентрация Ni варьируется в пределах от 2 до 18 мкг/л, что говорит о значительном превышении фонового уровня региона.

В результате проведенных исследований озер г. Мурманска установлено, что оз. Ледовое характеризуется наибольшей концентрацией Ni (см. табл. 6.3), наименьшая, как и V, отмечается в водах оз. Южное. Данные элементы являются элементами-индикаторами сжигания мазутного топлива (The sources..., 1973; In-use gaseous..., 2008; Peltier, Lippmann, 2010). Установленная достоверная положительная корреляция (рис. 6.13) между концентрациями ванадия и никеля (критическое значение  $r = 0,48$  при уровне значимости  $p < 0,01$ ) в водах исследуемых озер подтверждает значительное влияние со стороны Мурманской ТЭЦ и котельных города на состояние водных объектов. В воде исследуемых городских озер содержание V и Ni выше (как и Fe и Mn), чем среднее содержание в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (Heavy Metal..., 2001).

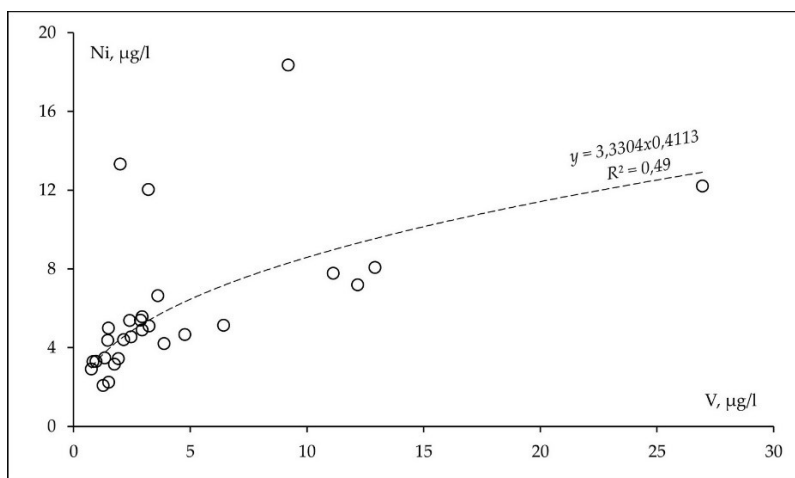


Рис. 6.13. Зависимость концентрации никеля от уровня содержания ванадия в исследуемых озерах

Увеличение содержания Ni в воде оз. Семеновское зафиксировано в зимнее время (рис. 6.12), как это было отмечено для V, Fe и Mn, однако, в отличие от последних перечисленных элементов, существенной разницы между содержаниями в поверхностном и придонном слоях не обнаружено. В летнее время концентрация Ni снижается за счет его разбавления при поступлении вод поверхностного стока (рис. 6.12), в озерах Ледовое и Среднее его содержание

больше в поверхностном слое водной толщи, а в оз. Треугольное, наоборот, в придонном (см. табл. 6.3).

Повышенное содержание меди в химическом составе поверхностных вод — характерная особенность водоемов Арктической зоны и Севера России, возникшая вследствие доминирования халькофильных элементов (группы представлены медью) на Балтийском щите, а также гумификации водосборных территорий озер Мурманской области (Янин и др., 2016). Концентрация Cu в воде озер г. Мурманска колеблется от 1,1 до 4,4 мкг/л, при этом максимальный уровень наблюдается в оз. Ледовое, минимальный — в оз. Южное. Для большинства озер города характерно превышение концентраций меди по сравнению с фоновым уровнем региона и ПДК<sub>рбхз</sub> в 2–4 раза. В отличие от ранее описанных микроэлементов рост содержания Cu наблюдается в летнее время (рис. 6.14), стоит отметить, что в поверхностном слое оно выше, чем в придонном, за исключением осеннего периода наступления гомотермии.

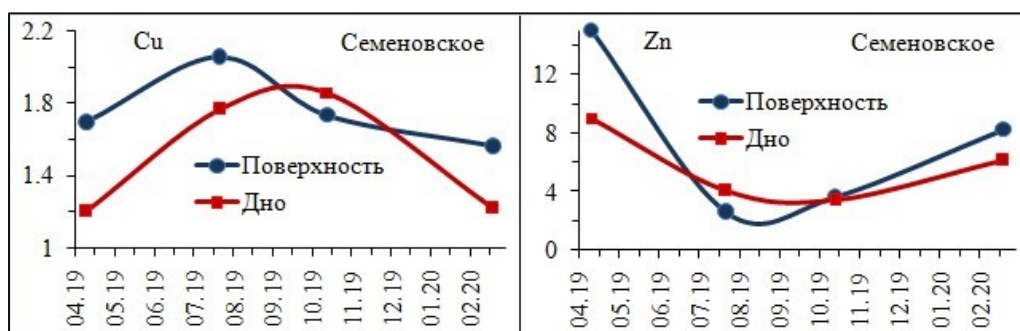


Рис. 6.14. Сезонное распределение содержания меди и цинка (мкг/л) в поверхностных и придонных слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

За время исследования озер г. Мурманска содержание цинка изменялось в пределах от 1,5 до 30 мкг/л. Для всех исследуемых водоемов характерно превышение фоновых значений по содержанию данного элемента (см. табл. 6.3), наибольший показатель зафиксирован в воде оз. Окуневое, наименьший — в оз. Южное. В воде озер Ледовое, Северное и Среднее также отмечены высокие концентрации Zn.

Цинк является биогенным элементом, и, возможно, его высокое содержание в данных озерах связано с разложением растительных остатков на водосборных территориях и дальнейшей его миграцией с поверхностным стоком и из почвенного горизонта в озерные воды в осенний и весенний периоды (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Титов и др., 2014). Уменьшение содержания Zn в воде оз. Семеновское в летнее время связано с интенсивным потреблением его фитопланктоном и водной растительностью (рис. 6.14). Антропогенным источником поступления Zn в городские водоемы является пыль, поднимающаяся с проезжей части магистралей при работе городского транспорта. «Обогащение» дорожной пыли цинком происходит за счет истирания шин и тормозных колодок автомобильного транспорта (Геохимия окружающей..., 1990; Review..., 2016). В воде оз. Треугольное концентрации Cu и Zn в придонном слое выше, чем в поверхностном, в остальных озерах наоборот: более «обогащен» поверхностный слой (см. табл. 6.3).

Практически во всех озерах, за исключением оз. Семеновское, превышен фоновый уровень содержания хрома (см. табл. 6.3), хотя в зимнее время в поверхностном слое воды оз. Семеновское его концентрации превышают фоновый уровень (0,5 мкг/л, Базова, 2017), а в летний и осенний периоды они снижаются (рис. 6.15). В придонном слое воды оз. Семеновское содержание Cr всегда ниже фонового уровня. Повышенные концентрации Cr в воде озер в зимнее время могут быть связаны с использованием противогололедных реагентов (Дрябжинский и др., 2017) (рис. 6.15).

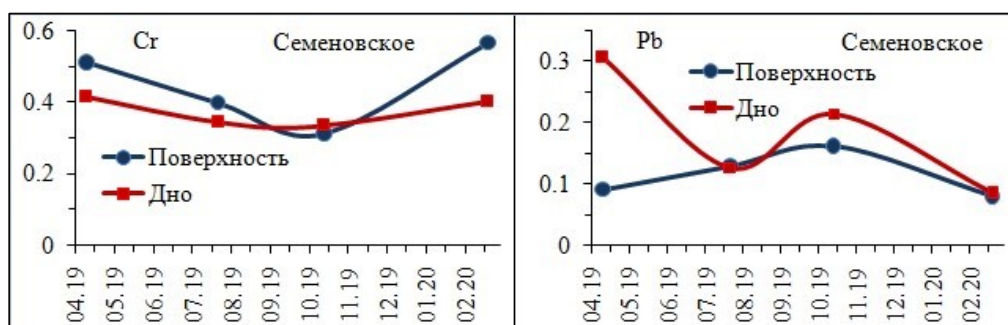


Рис. 6.15. Сезонное распределение содержания хрома и свинца (мкг/л) в поверхностном и придонном слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

Фоновый уровень содержания свинца превышен только в придонном слое воды оз. Треугольное, во всех других озерах он ниже (см. табл. 6.3, рис. 6.15). В придонном слое воды оз. Семеновское его содержание выше, чем в поверхностном. Использование этилированного, неэтилированного и малоэтилированного бензина являлось главным источником атмосферных выбросов Pb в XX в. особенно в городах, например, в 1995 г. составляя 74 % общих выбросов (Расуна, Расуна, 2001). В последние годы благодаря внедрению в стране неэтилированного бензина загрязнение от выхлопов транспорта уменьшилось, поэтому содержание этого чрезвычайно токсичного неэссенциального тяжелого металла в воде озер г. Мурманска ниже фонового уровня.

Фоновые уровни кобальта превышены в воде оз. Ледовое и в придонных слоях оз. Треугольное (до 1,2 мкг/л, табл. 6.3). Единичные случаи превышения фонового уровня зафиксированы в озерах Северное (до 1 мкг/л) и Семеновское (0,77 мкг/л, рис. 6.16). В зимнее время содержание Co в придонном слое воды оз. Семеновское почти на порядок больше, чем в поверхностном (рис. 6.16), летом оно выравнивается по всей толще воды. В воде лишь одного озера — Северное — превышены фоновые уровни молибдена, как и урана, между которыми установлен очень высокий коэффициент корреляции ( $r = 0,85$ ). Концентрации Mo в поверхностном и придонном слоях воды оз. Семеновское отличаются незначительно (рис. 6.16).

Концентрация вольфрама в озерах города не превышает фонового уровня, исключение составляет оз. Ледовое с показателем 1,84 мкг/л, что в три раза больше фоновых значений (см. табл. 6.3). Соединения вольфрама применяются в машиностроении — при производстве жидких смазочных и полиамидных композиционных материалов в качестве антифрикционных наночастиц (способствуют

уменьшению коэффициента трения), а также в качестве катализаторов в процессе переработки нефтяного топлива (Атомно-абсорбционное..., 2013). В непосредственной близости с оз. Ледовое расположены автозаправочная станция, автомойка, гаражные кооперативы, что также может быть причиной увеличения содержания этого металла в водах данного озера.



Рис. 6.16. Сезонное распределение содержания кобальта и молибдена (мкг/л) в поверхностных и придонных слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

В воде оз. Ледовое зафиксированы наибольшие содержания тяжелых металлов Ni, Cu, Zn, Co и W, как и Mn и Fe (см. табл. 6.3). Из всех исследуемых озер оно, судя по содержанию главных ионов, биогенных элементов, тяжелых металлов и нефтепродуктов, подвержено наибольшему антропогенному влиянию и является самым загрязненным. В оз. Ледовое также отмечена наибольшая трансформация структуры зоопланктона вследствие загрязнения и интенсивной антропогенной эвтрофикации (Исследования..., 2019). Концентрации V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn в воде всех городских озер выше, чем их средний уровень в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (Heavy Metal..., 2001).

Содержание металлов — щелочных лития и рубидия и щелочноземельных стронция и бария (как и главных катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) — в воде всех исследуемых озер (см. табл. 6.3) превышает средний уровень в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (Heavy Metal..., 2001), что обусловлено переносом морских аэрозолей, содержащих повышенные концентрации щелочных и щелочноземельных металлов. Высокие значения коэффициента корреляции (табл. 6.4) концентраций Li, Rb, Sr и Ba ( $r = 0,86–0,98$  при  $p < 0,01$ ) и с содержанием главных катионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ ) подтверждают вывод о поступлении всех щелочных и щелочноземельных металлов из одного источника, которым является влияние морских аэрозолей и урбанизированной территории, в том числе использование реагентов для противогололедной обработки городских дорог. Содержание щелочных и щелочноземельных металлов в воде оз. Семеновское снижается в летнее время и увеличивается зимой (в придонном слое) (рис. 6.17).

Из-за поступления морских аэрозолей в воде всех городских озер также увеличено содержание бора (см. табл. 6.3, рис. 6.18), которое значительно превышает среднее значение в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017). Высокие показатели коэффициента корреляции (табл. 6.4) концентраций бора

с щелочными и щелочноземельными металлами ( $r = 0,81-0,94$  при  $p < 0,01$ ), а также хрома ( $r = 0,70$  при  $p < 0,01$ ) говорят о совместном поступлении этих элементов в составе морских аэрозолей и противогололедных реагентов.

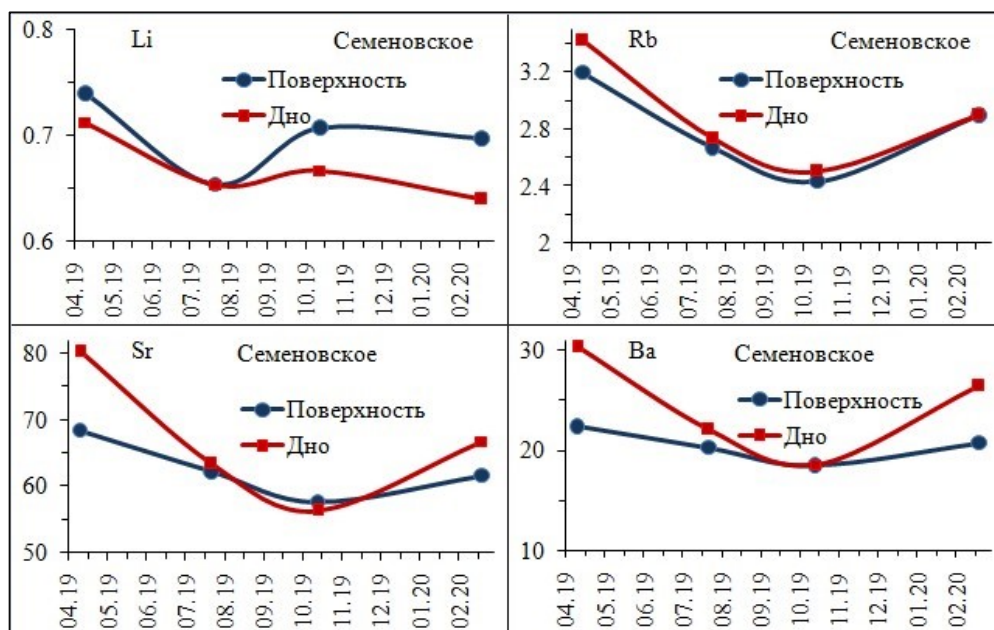


Рис. 6.17. Сезонное распределение содержания щелочных металлов лития и рубидия и щелочноземельных металлов стронция и бария (мкг/л) в поверхностных и придонных слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

Таблица 6.4

Коэффициенты корреляции между содержанием щелочных и щелочноземельных металлов и бором в воде озер г. Мурманска (критическое значение  $r = 0,48$  при  $p > 0,99$ ,  $n = 28$ )

Элемент	Li	Na	Mg	K	Ca	Rb	Sr	Ba	B
Li	1,00								
Na	0,91	1,00							
Mg	0,87	0,88	1,00						
K	0,91	0,88	0,98	1,00					
Ca	0,96	0,91	0,97	0,99	1,00				
Rb	0,91	0,90	0,87	0,92	0,93	1,00			
Sr	0,98	0,91	0,94	0,97	0,99	0,94	1,00		
Ba	0,90	0,91	0,96	0,94	0,96	0,86	0,95	1,00	
B	0,86	0,80	0,98	0,96	0,96	0,81	0,93	0,94	1,00

Фоновые уровни алюминия превышены в воде озер Ледовое, Окуновое, Треугольное и Северное (см. табл. 6.3), причем в первых двух водоемах его содержание в придонном слое воды выше, чем в поверхностном, как и в оз. Семеновское (рис. 6.18).

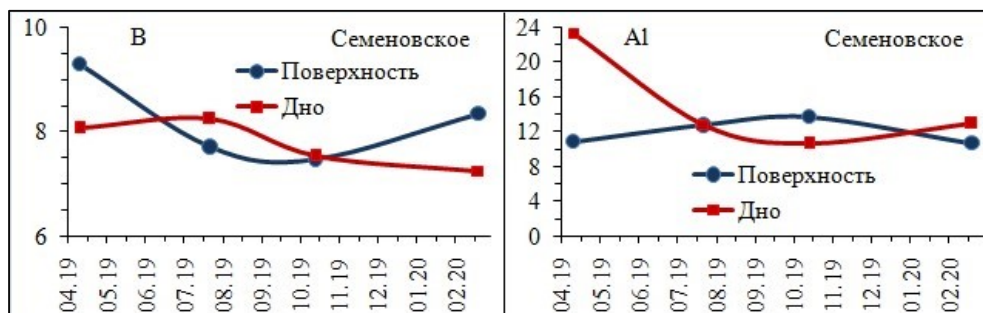


Рис. 6.18. Сезонное распределение содержания бора и алюминия (мкг/л) в поверхностных и придонных слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

**Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ).** В наших исследованиях они представлены скандием и иттрием и большой группой лантаноидов (табл. 6.5). Для удобства изложения к группе РЗЭ отнесем Sc, Y и будем рассматривать их совместно с лантаноидами (лантан La, церий Ce, празеодим Pr, неодим Nd, самарий Sm, европий Eu, гадолиний Gd, тербий Tb, диспрозий Dy, гольмий Ho, эрбий Er, тулий Tm, иттербий Yb, лютеций Lu). Все они относятся к побочной подгруппе III группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Все РЗЭ характеризуются чрезвычайной близостью химических и геохимических свойств благодаря специфическому строению их электронных оболочек. По химической активности РЗЭ уступают лишь щелочным и щелочноземельным металлам, причем она возрастает с увеличением порядкового номера элементов (Jarvis, 1988).

В минералах для РЗЭ свойственна валентность, равная трем. В дополнение Ce встречается в четырехвалентной форме в окислительных условиях, а  $\text{Eu}^{3+}$  может восстанавливаться до  $\text{Eu}^{2+}$ . Лантаноиды характеризуются прогрессивным снижением радиуса иона от 0,103 нм для  $\text{La}^{3+}$  до 0,0861 нм для  $\text{Lu}^{3+}$  (Shannon, 1976). Часто РЗЭ подразделяются на легкие редкие земли (ЛРЗЭ) — от La до Gd и тяжелые редкие земли (ТРЗЭ) — от Tb до Lu.

Хотя вся группа имеет сходное поведение, ЛРЗЭ характеризуются более высокими содержаниями, чем ТРЗЭ, в минералах, в таких, например, как апатит, сфен, циркон, монацит и др. По геохимической классификации элементов по их поведению в земной коре А. И. Перельман (1990) относит РЗЭ к III группе, к классу литофильных элементов с постоянной валентностью, способных образовывать как катионы, так и анионы.

Редкоземельные элементы относятся к типоморфным элементам не только Хибинских гор и апатитовой индустрии (Галахов, 1975; Моисеенко и др., 1997; Даувальтер и др., 1999), но и коренных горных пород Скандинавского кристаллического щита, в том числе и Мурманской области. Y, La, Ce, Pr и Nd обнаружены в оз. Имандра в растворенной и взвешенной фракциях, остальные главным образом в составе взвесей в количествах, не превышающих 4 нг/л (Даувальтер и др., 1999).

Высокие значения коэффициентов корреляции между содержанием всех редкоземельных элементов в воде озер г. Мурманска подтверждают чрезвычайную близость химических и геохимических свойств и поведение этих элементов в исследуемых водных системах (табл. 6.6).

Таблица 6.5

Медианные значения концентраций (мкг/л) РЗЭ в воде озер Мурманска, озер северо-восточной части водосбора Баренцева моря (БМ) (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (СФ) (Heavy Metal..., 2001) и пределы содержаний в воде пресноводных экосистем (ПЭ) (Никаноров, Жулидов, 1991)

Элемент	Северное	Семеновское	Среднее	Окуновое	Ледовое	Треугольное	Южное	БМ	СФ	ПЭ
Sc	0,191	<u>0,0094</u> <0,01	<u>&lt;0,01</u> <0,01	<0,01	<u>1,33</u> 2,12	<u>0,125</u> 0,346	<u>&lt;0,01</u> <0,01	0,41	–	–
Y	0,080	<u>0,015</u> 0,018	<u>0,0102</u> 0,0094	0,067	<u>0,088</u> 0,174	<u>0,083</u> 0,130	<u>0,011</u> 0,011	0,43	–	0,03–0,7
La	0,141	<u>0,084</u> 0,074	<u>0,063</u> 0,023	0,173	<u>0,236</u> 0,337	<u>0,252</u> 0,469	<u>0,036</u> 0,011	1,36	–	0,06–0,2
Ce	0,119	<u>0,015</u> 0,036	<u>0,025</u> 0,013	0,202	<u>0,326</u> 0,485	<u>0,320</u> 0,643	<u>0,0107</u> 0,0110	1,63	0,212	0,08–2
Pr	0,025	<u>0,0041</u> 0,0056	<u>0,0041</u> 0,0035	0,032	<u>0,043</u> 0,069	<u>0,043</u> 0,079	<u>0,0028</u> 0,0026	1,21	–	0,007
Nd	0,096	<u>0,016</u> 0,020	<u>0,013</u> 0,012	0,114	<u>0,160</u> 0,270	<u>0,164</u> 0,271	<u>0,010</u> 0,010	0,54	0,15	0,04
Sm	0,017	<u>0,0036</u> 0,0040	<u>0,0017</u> 0,0016	0,020	<u>0,024</u> 0,044	<u>0,028</u> 0,047	<u>0,0014</u> 0,0023	0,83	<0,03	0,008–1
Eu	0,0088	<u>0,0026</u> 0,0030	<u>0,0024</u> 0,0020	0,0069	<u>0,011</u> 0,019	<u>0,0072</u> 0,0110	<u>0,0071</u> 0,0078	–	–	0,001–0,03
Gd	0,017	<u>0,0032</u> 0,0041	<u>0,0023</u> 0,0018	0,018	<u>0,022</u> 0,042	<u>0,023</u> 0,038	<u>0,0018</u> 0,0021	0,46	–	0,008
Tb	0,0022	<u>0,0004</u> 0,0005	<u>0,0003</u> 0,0003	0,0020	<u>0,0026</u> 0,0046	<u>0,0027</u> 0,0045	<u>0,0003</u> 0,0004	–	–	0,001



Окончание таблицы 6.5

Элемент	Северное	Семеновское	Среднее	Окуневое	Ледовое	Треугольное	Южное	БМ	СФ	ПЭ
Dy	0,011	<u>0,0020</u> 0,0024	<u>0,0013</u> 0,0012	0,010	<u>0,014</u> 0,027	<u>0,015</u> 0,027	<u>0,0014</u> 0,0015	–	–	–
Ho	0,0027	<u>0,0006</u> 0,0006	<u>0,0004</u> 0,0002	0,0024	<u>0,0038</u> 0,0071	<u>0,0031</u> 0,0051	<u>0,0004</u> 0,0004	–	–	0,001
Er	0,0075	<u>0,0014</u> 0,0014	<u>0,0011</u> 0,0008	0,0076	<u>0,013</u> 0,026	<u>0,0083</u> 0,0136	<u>0,0012</u> 0,0011	–	–	0,004
Tm	0,0014	<u>0,0002</u> 0,0002	<u>0,0002</u> 0,0001	0,0013	<u>0,0027</u> 0,0048	<u>0,0013</u> 0,0017	<u>0,0003</u> 0,0002	–	–	0,001
Yb	0,0084	<u>0,0011</u> 0,0011	<u>0,0011</u> 0,0011	0,0102	<u>0,021</u> 0,038	<u>0,0076</u> 0,0111	<u>0,0021</u> 0,0020	–	–	0,004–0,085
Lu	0,0015	<u>0,0002</u> 0,0002	<u>0,0002</u> 0,0003	0,0020	<u>0,0048</u> 0,0079	<u>0,0011</u> 0,0017	<u>0,0005</u> 0,0003	–	–	0,001
Σ PЗЭ	0,651	<u>0,0624</u> 0,0913	<u>0,0628</u> 0,0472	0,506	<u>1,401</u> 3,336	<u>0,832</u> 1,630	<u>0,0453</u> 0,0534	–	–	–

Таблица 6.6

Коэффициенты корреляции между содержанием редкоземельных элементов в воде озер г. Мурманска (критическое значение  $r = 0,48$  при  $p > 0,99$ ,  $n = 28$ )

РЗЭ	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Y	1,00														
La	0,90	1,00													
Ce	0,91	0,97	1,00												
Pr	0,96	0,97	0,99	1,00											
Nd	0,97	0,96	0,98	1,00	1,00										
Sm	0,97	0,96	0,97	1,00	1,00	1,00									
Eu	0,92	0,77	0,81	0,86	0,88	0,87	1,00								
Gd	0,99	0,94	0,96	0,99	0,99	0,99	0,89	1,00							
Tb	0,99	0,94	0,95	0,99	0,99	0,99	0,88	1,00	1,00						
Dy	0,99	0,93	0,95	0,98	0,99	0,99	0,88	0,99	1,00	1,00					
Ho	1,00	0,90	0,92	0,96	0,98	0,97	0,93	0,99	0,98	0,98	1,00				
Er	0,98	0,86	0,89	0,93	0,95	0,94	0,94	0,96	0,95	0,95	0,99	1,00			
Tm	0,95	0,80	0,84	0,88	0,91	0,89	0,94	0,92	0,91	0,90	0,96	0,99	1,00		
Yb	0,92	0,77	0,82	0,85	0,89	0,86	0,93	0,90	0,88	0,87	0,94	0,98	1,00	1,00	
Lu	0,88	0,73	0,78	0,81	0,85	0,82	0,91	0,86	0,83	0,83	0,91	0,96	0,99	1,00	1,00

Содержание РЗЭ в воде озер г. Мурманска не превышает среднего уровня в озерах водосбора Баренцева моря (Базова, 2017) и Северной Фенноскандии (Heavy Metal..., 2001), за исключением скандия в оз. Ледовое (см. табл. 6.5), концентрации которого в 3–5 раз выше фонового значения. Содержания РЗЭ в озерах Ледовое, Треугольное, Северное и Окуновое превышают указанные в монографии пределы концентраций в воде пресноводных экосистем (Никаноров, Жулидов, 1991), особенно в первых двух озерах.

Несмотря на высокую корреляцию между содержаниями РЗЭ (см. табл. 6.6), сезонное распределение концентраций отдельных элементов этой группы отличается (рис. 6.19), для них отмечается характерное снижение содержания в летнее время и увеличение в зимнее, так же как и для практически всех компонентов химического состава исследуемых озер. В оз. Семеновское существенной разницы содержания РЗЭ между поверхностным и придонным слоем воды не выявлено, однако в придонном слое концентрации РЗЭ, за исключением La, как правило, несколько выше (см. табл. 6.6, рис. 6.19).

В озерах Ледовое и Треугольное содержание РЗЭ в придонном слое выше, чем в поверхностном (см. табл. 6.6), что связано с влиянием изменения окислительно-восстановительных условий, отмеченным ранее в распределении РЗЭ в толще воды оз. Имандра (Даувальтер и др., 1999). Редкоземельные элементы, как и все микроэлементы, поступают в озера как во взвешенном, так и в растворенном состоянии, и в результате сложных процессов, протекающих в водной толще, захораниваются в донных отложениях.

Среди этих процессов выделяются главные:

1) седиментация в составе минеральных и органических твердых взвешенных частиц;

2) вовлечение элементов в редокс-цикл, связанный в первую очередь с изменениями восстановительно-окислительных условий в водной толще и донных отложениях.

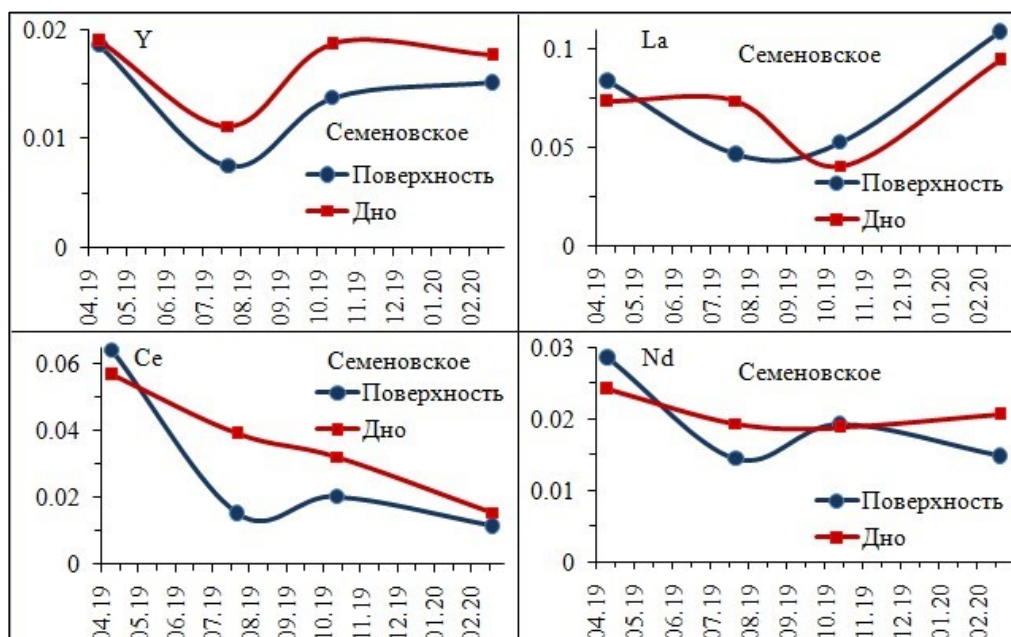


Рис. 6.19. Сезонное распределение содержания редкоземельных элементов (мкг/л) в поверхностном и придонном слоях воды оз. Семеновское в 2019–2020 гг.

Известно, что РЗЭ являются элементами-комплексообразователями (Перельман, 1990). Тяжелые РЗЭ (иттриевая группа по А.И. Перельману, 1990) способны образовывать карбонатные комплексы. Крайнов (1973) публикует следующий ряд по способности редкоземельных элементов к комплексообразованию:  $La^{3+} < Ce^{3+} < Y^{3+} < Yb^{3+} < Ce^{4+}$ . Как уже упоминалось, в озерах Ледовое и Треугольное обозначилась стратификация окислительно-восстановительных условий в водной толще в зимний период в результате окисления накопленного на дне органического материала. Хорошо известно, что редокс-механизмы Mn и Fe в водных объектах играют центральную роль в геохимическом круговороте некоторых элементов (Davison, 1985), в том числе и редкоземельных. Данные исследования подтверждают вовлечение РЗЭ в эти циклы, позволяют также оценить комплексообразование соединений Mn и Fe с РЗЭ, что подтверждают высокие значения коэффициента корреляции между этими элементами, которые лежат в пределах  $r = 0,68-0,82$  (критическое значение  $r = 0,48$  при  $p > 0,99$ ,  $n = 28$ ). Из всех исследуемых микроэлементов подобные высокие значения коэффициента корреляции ( $r = 0,68-0,80$ ) содержания Mn и Fe обнаружены с хромом и кобальтом, которые способны также реагировать меняющейся степенью окисления в зависимости от окислительно-восстановительных условий.

**Содержание углеводов.** Результаты определения содержания нефтяных углеводов в воде озер Мурманска представлены в табл. 6.7 и на рис. 6.20.

Таблица 6.7

Содержание нефтяных углеводородов в воде озер г. Мурманск, мг/л

Озеро	Поверхностный слой	Придонный слой	ПДК
Окуневое	0,061±0,026		0,3*/0,05**
Среднее	0,054±0,023	0,062±0,026	
Треугольное	0,047±0,020	0,030±0,013	
Семеновское	0,041±0,017	0,058±0,024	
Южное	0,070±0,029	0,052±0,022	
Северное	0,051±0,022		
Ледовое	0,072±0,030	0,135±0,046	

\* Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»»

\*\* Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 № 552).

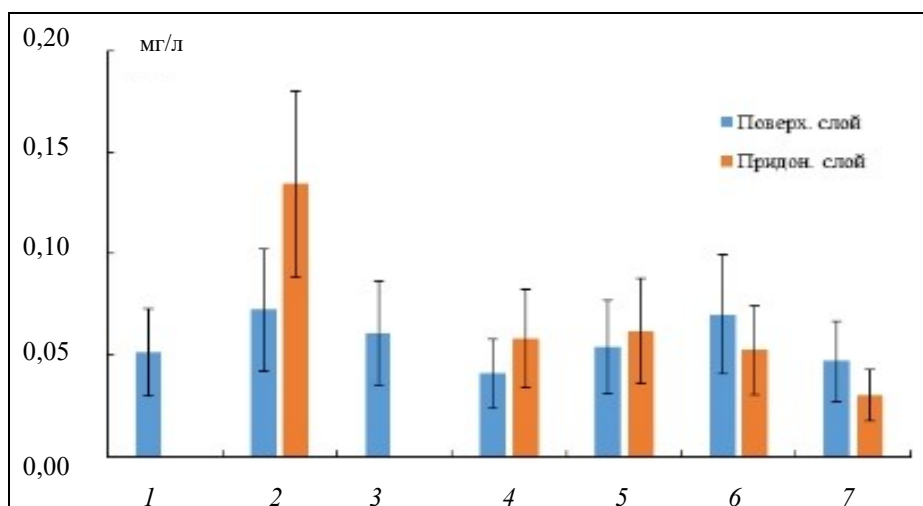


Рис. 6.20. Содержание углеводородов в озерах г. Мурманск: 1 — Северное; 2 — Ледовое; 3 — Окуневое; 4 — Семеновское; 5 — Среднее; 6 — Южное; 7 — Треугольное

Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в воде исследованных озер нет превышения установленных показателей по содержанию нефти и нефтепродуктов. Данный норматив распространяется на водные объекты хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. При этом максимальное содержание нефтяных углеводородов обнаружено в придонном слое оз. Ледовое, что в 2,5–3 раза превышает таковое в остальных озерах. Повышенное содержание углеводородов в поверхностном слое воды характерно для оз. Ледовое, а также для оз. Южное, которое находится в промышленной зоне города.

Для водных объектов рыбохозяйственного значение норматив содержания нефти и нефтепродуктов ниже, он составляет 0,05 мг/л. В этом случае можно говорить о превышении ПДК нефтепродуктов в воде оз. Ледовое и в поверхностном слое воды оз. Южное. Максимальная кратность превышения ПДК нефтепродуктов в поверхностном слое воды озер г. Мурманска составляет 1,4 (оз. Ледовое, Южное), что соответствует низкому уровню загрязненности, в придонном слое — 2,7 (оз. Ледовое), что соответствует среднему уровню загрязненности (табл. 6.8).

Из всех исследованных водоемов оз. Треугольное в меньшей степени испытывает нагрузку по показателю содержания нефтяных углеводородов в воде, содержание нефтепродуктов в ней не превышает нормативов для водоемов рыбохозяйственного значения.

Таблица 6.8

Кратность превышения значений ПДК нефтепродуктов  
в воде и уровень загрязнения озер г. Мурманск

Северное	Ледовое	Окуновое	Семеновское	Среднее	Южное	Треугольное
Поверхностный слой						
1,0 (низкий)	1,4 (низкий)	1,2 (низкий)	нет	1,1 (низкий)	1,4 (низкий)	нет
Придонный слой						
–	2,7 (средний)	–	1,2 (низкий)	1,2 (низкий)	1,0 (низкий)	нет

## Глава 7 ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕР

**Гранулометрический состав.** По гранулометрической классификации (Субетто, 2009), осадки исследуемых озер представлены в основном песчаными и алевритовыми типами (табл. 7.1). В осадках оз. Треугольное наблюдается доминирование псаммитовых фракций (69 %), которое происходит в основном за счет вклада фракций с размером зерен от 0,5 до 0,25 и от 0,25 до 0,05 мм. Донные осадки озер Северное и Южное следует отнести к алевритовым пескам вследствие того, что на долю псаммитовых фракций в отложениях обоих водоемов приходится 55 %, а алевритовых — 45 и 43 % соответственно. Помимо этого, в пробах из оз. Южное отмечены псефитовые и пелитовые осадки, по 1 % каждого типа.

Во фракционном составе донных осадков оз. Ледовое преобладают алевриты (83 %), соотношение фракций с размером зерен от 0,05 до 0,01 и от 0,01 до 0,005 мм на одном уровне (39 и 44 % соответственно). Донные отложения озер Окуновое, Среднее и Семеновское также относятся к алевритовому типу, однако, в отличие от оз. Ледовое, в данных водоемах зафиксировано явное преобладание (71–76 %) грубого алеврита с размером частиц от 0,05 до 0,01 мм, 22 % приходится на долю мелкоалевритовых фракций. Мелкозернистые песчаные частицы размером от 0,25 до 0,005 мм составляют 23–29 % от общей массы отложений. Также в составе донных отложений озер Окуновое и Среднее наблюдается до 1 % глинистых отложений. Таким образом, отложения оз. Ледовое имеют наибольшее количество частиц фракций 0,01–0,005 мм по сравнению с другими городскими водоемами. Только некоторые слои в колонках отложений озер Северное, Среднее и Окуновое имеют близкое к отложениям оз. Ледовое число алевритовых фракций (рис. 7.1).

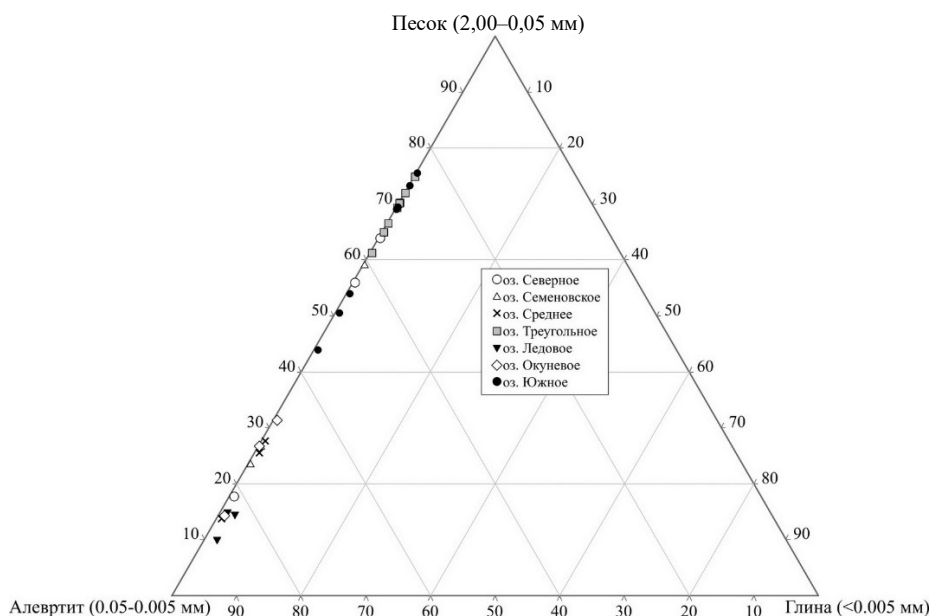


Рис. 7.1. Треугольная диаграмма отношений гранулометрических фракций донных отложений озер г. Мурманска

Таблица 7.1

## Гранулометрический состав донных отложений в исследуемых озерах, %

Озеро	Размер фракций, мм										Тип и наименование осадка (Субетто, 2009)
	Псефиты	Псаммиты				Алевриты		Пелиты	Σпсам	Σал	
	> 1 мм	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005	1–0,05	0,05–0,005	
Треугольное	1	7	17	25	20	26	4	–	69	30	Песчаный, песок
Северное	–	4	9	25	17	35	10	–	55	45	Песчаный, алевритовый песок
Южное	1	4	8	21	22	36	7	1	55	43	Песчаный, алевритовый песок
Ледовое	–	–	1	9	5	39	44	2	15	83	Алевритовый, алеврит
Окуневое	–	–	–	12	14	51	22	1	26	73	Алевритовый, алеврит
Среднее	–	–	–	9	14	54	22	1	23	76	Алевритовый, алеврит
Семеновское	–	–	2	11	16	49	22	–	29	71	Алевритовый, алеврит

Примечание. Σпсам — сумма псаммитовых фракций; Σал — сумма алевритовых фракций.

**Главные элементы.** Относительно содержания органического вещества (по ППП) донные отложения мурманских озер относятся к органосиликатному классу (Синькевич, Экман, 1995). Исключение составляют осадки оз. Южное (относятся к минеральному классу донных отложений) и отложения оз. Ледовое (относятся к органожелезистому классу). Наиболее высокое содержание органического вещества отмечено в осадках озер Северное (44,6 %), Окуновое (45,1 %), Семеновское (45,6 %) и Треугольное (50,1 %). В отложениях оз. Среднее содержание органики составляет 38,7 %, в осадках озер Ледовое и Южное — 19 и 10 % соответственно (табл. 7.2). Наиболее высокие концентрации кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) выявлены для донных отложений озер Среднее и Ледовое (42 и 45 % соответственно). Также по сравнению с другими озерами города Мурманска в осадках оз. Ледовое установлены наибольшие концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и S.

Таблица 7.2

Средние содержания органического вещества (ППП), оксидов Si, Fe и Al, %

Озеро	Класс отложений	ППП	$\text{SiO}_2$	$\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Северное	Органосиликатный	44,6	36,2	7,4	5,7
Семеновское	То же	45,6	30,7	8,2	7,5
Среднее	«	38,7	42,3	6,0	8,5
Треугольное	«	50,1	32,5	7,6	5,7
Ледовое	Органожелезистый	18,9	44,5	10,5	13,4
Окуновое	Органосиликатный	45,1	н/д	н/д	н/д
Южное	Минеральный	10,0	н/д	н/д	н/д

**Содержание микроэлементов.** Анализ содержания редких (микро-) элементов в верхних слоях донных отложений озер г. Мурманска показал (рис. 7.2), что относительно кларка верхней части земной коры осадки изученных водных объектов обогащены:

- оз. Северное — Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb, Bi и U;
- оз. Семеновское — V, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, PЗЭ, W, Pb и Bi;
- оз. Среднее — V, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, PЗЭ, W, Pb, Bi и U;
- оз. Треугольное — Cu, Zn, Mo, Cd, Sb, PЗЭ, Pb и Bi;
- оз. Ледовое — Li, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb и Bi;
- оз. Окуновое — Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb, Bi и U;
- оз. Южное — Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, PЗЭ, Pb и Bi.

Как видно, наиболее высокие превышения кларка установлены по Cu, Zn, Mo, Cd, Sb, Pb и Bi в донных отложениях практически для всех городских озер Мурманска. Также выделяется повышенный уровень W в отложениях оз. Ледовое и U в отложениях оз. Северное. С учетом того, что большинство элементов, имеющих повышенный уровень накопления в изученных отложениях, относятся к числу тяжелых металлов, то очевидно предположить, что происхождение выявленных геохимических аномалий связано с влиянием антропогенных факторов, особенно если учесть, что эти элементы имеют повышенный уровень относительно фона и в воде изученных озер. Также на рис. 7.2 видно, что донные



отложения преимущественно обеднены Ti (все водоемы, кроме озер Ледовое и Южное), Rb (кроме оз. Ледового), Zr, Nb, Cs, Hf и Th.

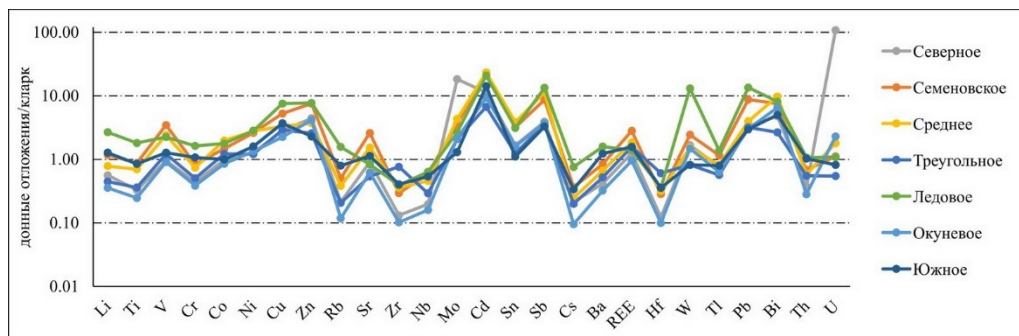


Рис. 7.2. Нормированные по кларку и логарифмированные средние содержания микроэлементов в донных отложениях (0–20 см) озер г. Мурманска

Сравнение средних содержаний тяжелых металлов (рис. 7.3) в донных отложениях (слой 0–20 см) озер г. Мурманска с фоновым содержанием выбранных элементов в отложениях юга Карелии — региона, который геологически близок к Мурманской области, показало, что по всем элементам отмечено превышение фона, больше всего по Sr, Sn, Sb, W и Pb. Все это также говорит о существенной роли техногенных факторов в формировании современных отложений озер г. Мурманска.

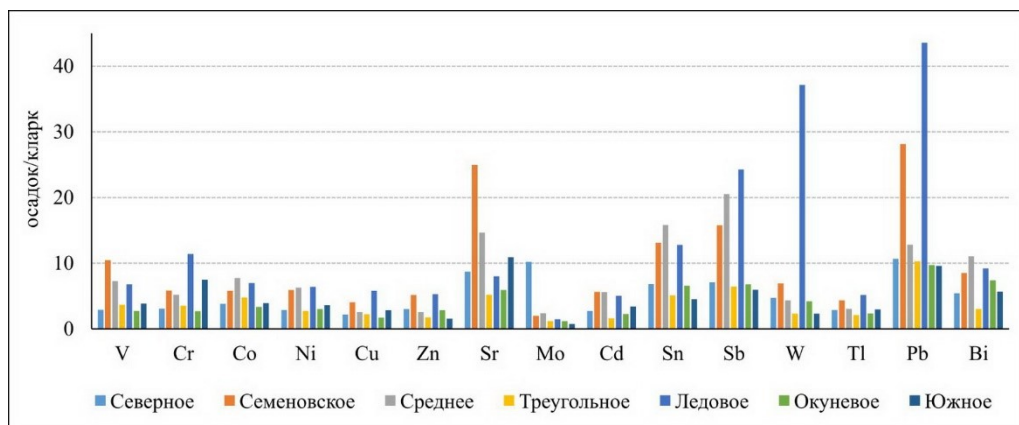


Рис. 7.3. Сравнение концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер г. Мурманска с фоновым содержанием

Вертикальное распределение тяжелых металлов в колонках озер (изучены колонки озер Северное, Семеновское, Среднее, Ледовое и Окуновое) показало практически одну и ту же динамику поведения загрязнителей. В отложениях оз. Семеновское (рис. 7.4), например, видно четкое увеличение содержания V и Ni с глубины 17 см, что демонстрирует влияние мазутных котельных и ТЭЦ города, которые начали работать на этом виде топлива в 1960-х гг. (ранее использовался уголь). С учетом того, что в послевоенные годы в СССР отмечался

резкий рост развития промышленности и урбанизированных территорий, в том числе на Севере, повышение концентраций других тяжелых металлов в отложениях оз. Семеновское с глубин 16–20 см демонстрирует последствия (в виде загрязнения окружающей среды) этого процесса. Например, наличие Pb, скорее всего, тесно связано с деятельностью автомобильного транспорта, который в те годы активно использовал этилированный (содержащий добавки Pb) бензин (Thomas, 1995). Схожие закономерности поведения Pb в городских озерах можно найти в других исследованиях ученых России и других стран (Isotope..., 2013; Геохимическая..., 2017). Кроме того, нельзя не отметить, что большой вклад в загрязнение окружающей среды г. Мурманска вносили и вносят пылевые выбросы от Мурманского порта, где осуществляется хранение угля. В частности, повышенные содержания Zn, Pb, Sn, Sb, Cd и Bi могут быть связаны с этим процессом, если учитывать, что все указанные элементы обычно входят в состав топочных углей (Юдович, Кетрис, 2005).

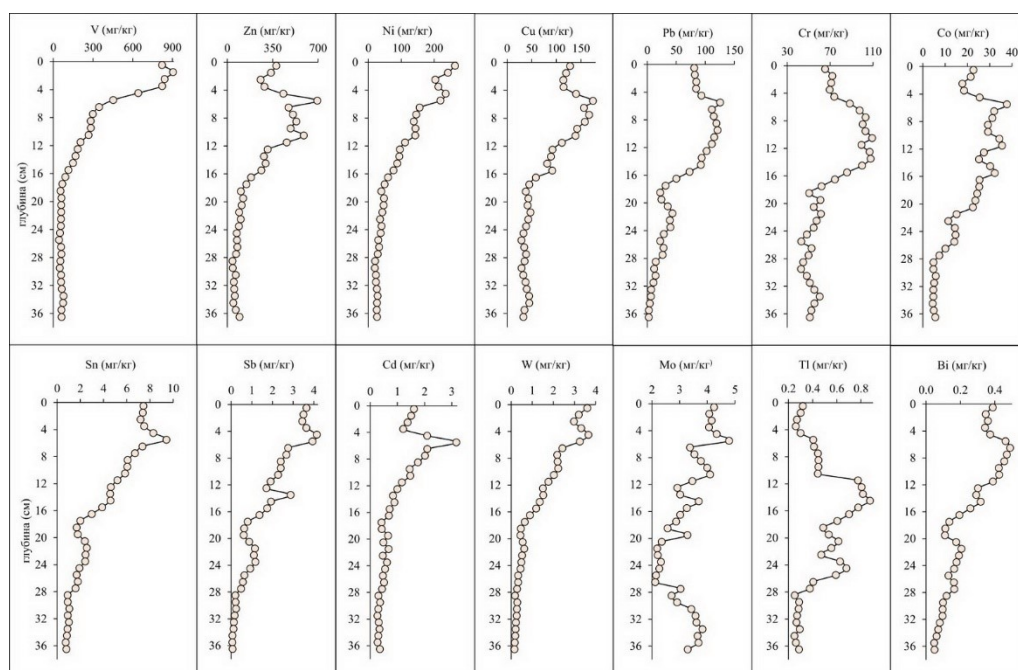


Рис. 7.4. Вертикальное распределение тяжелых металлов в отложениях оз. Семеновское

В колонках отложений всех озер, за исключением оз. Ледовое, нижние слои осадков имеют фоновые или близкие к фоновым уровни концентраций тяжелых металлов. В оз. Ледовое условно чистые слои отложений, вероятно, находятся глубже 30–40 см (рис. 7.5), что нехарактерно для донных отложений северных озер, особенно на севере Мурманской области. Вероятно, высокая скорость седиментации в оз. Ледовое напрямую связана с его интенсивным загрязнением со стороны города и, в частности, со стороны автосервисов, заправочной станции и автостоянок. Кроме того, не исключено, что в ходе очисток дна озера, о которых имеется неофициальная информация, часть осадков была переотложена, что и привело к большой мощности техногенных отложений в водоеме. О возможном

переотложении слоев говорит и тот факт, что содержание ванадия в осадках оз. Ледовое существенно ниже, чем в аналогичных слоях отложений других озер г. Мурманска.

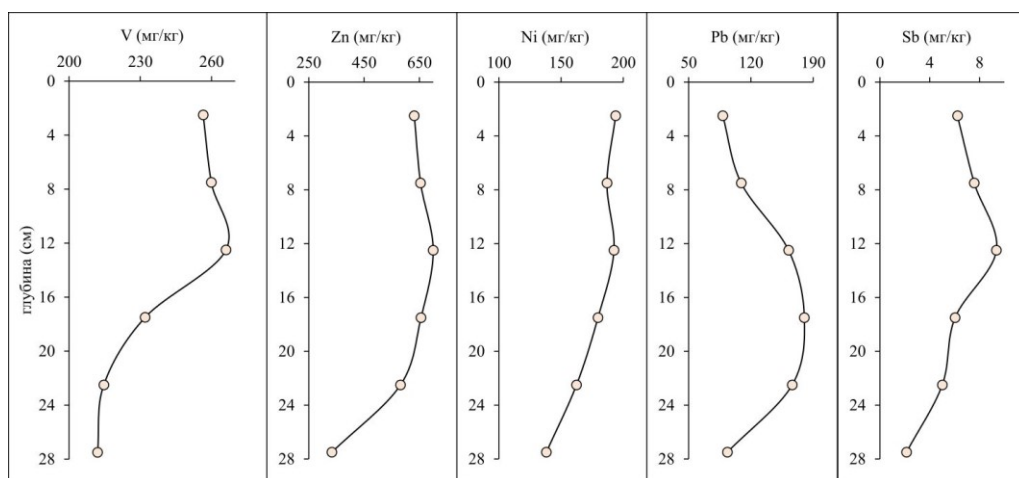


Рис. 7.5. Вертикальное распределение тяжелых металлов в отложениях оз. Ледовое

Кроме тяжелых металлов, в колонках отложений изученных озер отмечается динамика увеличения концентраций щелочных металлов и РЗЭ от нижних слоев к верхним (рис. 7.6). Схожее поведение редкоземельных элементов и щелочных металлов ранее уже отмечалось в современных донных отложениях малых озер городских районов Севера России (Слуковский, 2019). Наиболее вероятно, что РЗЭ, щелочные металлы и другие элементы-литофилы, которые не имеют явного техногенного происхождения, могут попадать в водную среду городских озер с городской пылью и частицами почвы или четвертичных отложений, которые в условиях города подвергаются интенсивному преобразованию (Faruque, Hawa, 2007; Rare earth..., 2017). При этом концентрации этих элементов в осадках водных объектов городской среды могут иметь значимую корреляцию с традиционными загрязнителями (Слуковский, Светов, 2016). Нами было выяснено, что в отложениях мурманских озер с суммарной концентрацией РЗЭ тесно связаны содержания Pb в этих же отложениях, например, это хорошо видно по отложениям оз. Семеновское (рис. 7.7). Скорее всего, и Pb (один из главных геохимических агентов загрязнения городских озер), и РЗЭ поступали в водоем от разных источников, но в одно и то же время: в частности, обильные выбросы от автотранспорта в 1960–1980-е гг. могли совпасть со временем активного строительства в городе и вообще с активным освоением данной территории.

Расчет интегрального индекса загрязнения PLI показал (рис. 7.8), что верхние (0–20 см) слои отложений изученных городских озер характеризуются высоким (даже экстремальным) уровнем загрязнения по основным тяжелым металлам (выбрано 15 элементов). Наибольшим загрязнением, что и ожидалось по состоянию воды, характеризуется оз. Ледовое, здесь PLI составляет 8,8. Вторым по уровню загрязнения тяжелыми металлами, согласно анализу донных отложений, является оз. Семеновское, здесь PLI равен 7,7. Что касается остальных

озер, то значения убывают в следующем порядке (от более загрязненного к менее загрязненному): *Среднее* > *Северное* > *Южное* > *Окуновое*.

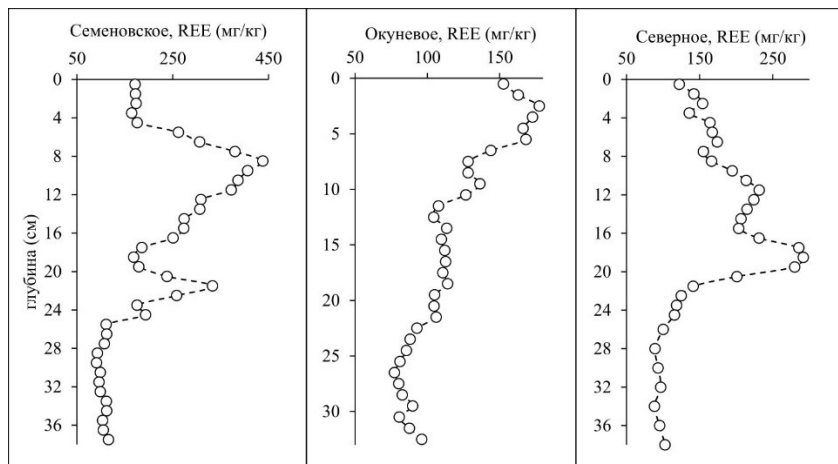


Рис. 7.6. Вертикальное распределение концентраций редкоземельных элементов в отложениях озер г. Мурманска

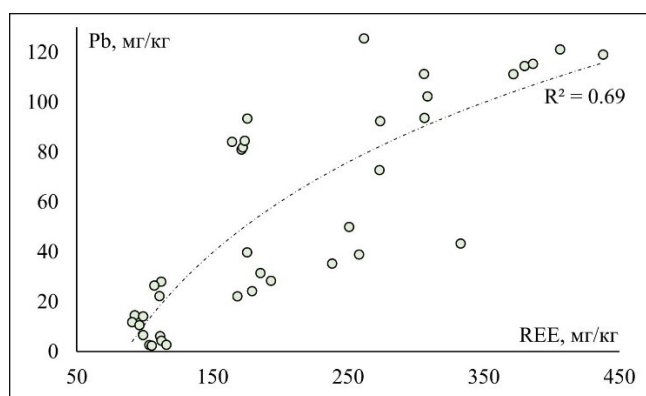


Рис. 7.7. Взаимосвязь концентраций свинца и редкоземельных элементов в отложениях озер г. Мурманска

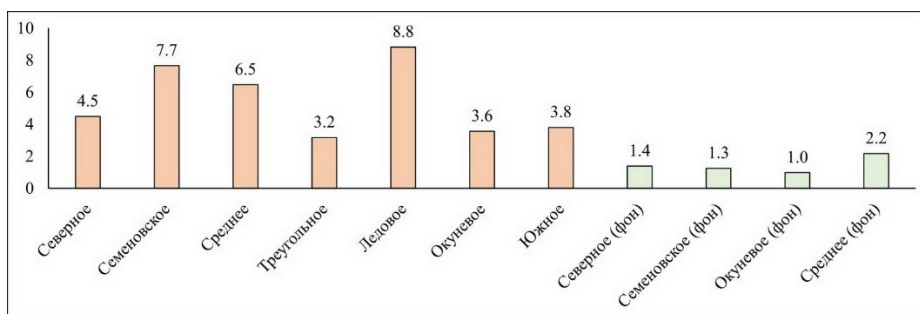


Рис. 7.8. Значения индекса PLI для донных отложений озер г. Мурманска (оранжевые столбики — верхние (0–20 см) слои, зеленые — фоновые слои (30–35 см))

Для фоновых слоев (взяты глубины 30–35 см) отложений изученных городских озер характерны значения индекса PLI от 1,0 до 2,2. Самое большое значение выявлено для оз. Среднего, что соответствует высокому уровню загрязнения, однако такая ситуация, вероятно, связана с повышенным природным фоном некоторых металлов в отложениях этого водоема. Например, в колонке отложений оз. Среднее отмечаются пики концентраций Co, Cr, Mo, Tl и V. Не исключено, что в подстилающих породах или породах водосбора содержания указанных металлов повышенные. Для остальных трех озер уровень загрязнения фоновых слоев отложений умеренный, что близко уровню PLI для озер нетронутых районов региона исследования (Recent sediments..., 2021). Для озер Окуновое и Южное фоновые слои отбирались, но не были проанализированы, а нижние слои колонок отложений оз. Ледовое не подошли под фоновые слои, так как в них было выявлено наличие нефтепродуктов и превышение концентраций тяжелых металлов.

Природное, в первую очередь геологическое, влияние на геохимию озер г. Мурманска нельзя исключать из общей интерпретации полученных данных. Наиболее ярко это проявилось на примере отложений оз. Северное, где было установлено повышенное над кларком и фоном содержание U и Mo (Урановые аномалии..., 2020). На рис. 7.9 показано, что концентрации обоих металлов увеличиваются от верхних слоев отложений озера к нижним, достигая максимальных концентраций 204 мг/кг для U (в 120 раз выше кларка) и 26 мг/кг для Mo (в 24 раза выше кларка), причем отмечается значимая положительная корреляция между этими металлами. Все это хорошо объясняется тем, что оз. Северное находится в геологическом районе, в котором отмечены несколько месторождений и множество рудопроявлений U (Урановое оруденение..., 1995; Age and..., 2018, Лицевский..., 2021).

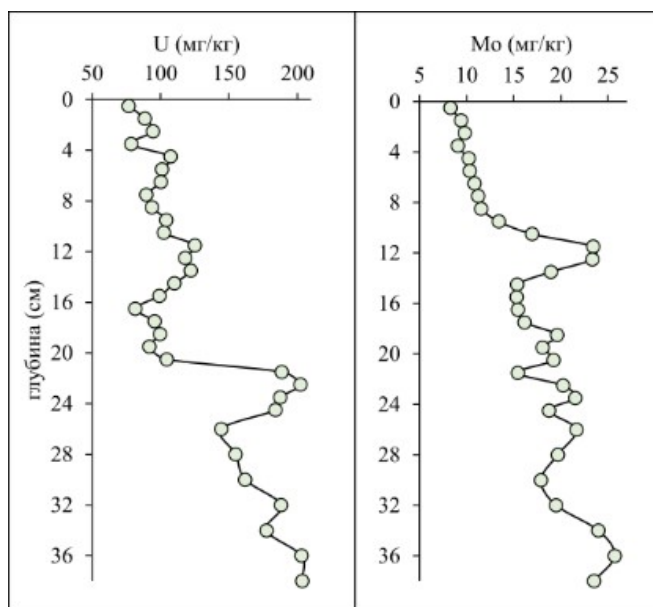


Рис. 7.9. Вертикальное распределение концентраций урана и молибдена в отложениях оз. Северное

Схожие закономерности были наблюдались и в другом малом озере северной части Мурманской области (вблизи национального парка «Полуострова Рыбачий и Средний») (Урановые аномалии..., 2020). Следовательно, влияние геохимических особенностей пород данного региона может быть вполне существенным, тем более что в породах с повышенным содержанием U и Mo отмечается и повышенное содержание Y, La, Ce, Pb, Be, Zn, Cu, Sn, Ag и других элементов. Не исключено, что на геохимию фоновых слоев отложений оз. Среднее также могли повлиять описанные процессы, если принять во внимание то, что расстояние между ним и оз. Северное не превышает 10 км.

**Формы нахождения редких элементов в донных отложениях.** Частицы промышленной пыли различной формы, которые были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа в пробе снега с ледового покрова оз. Среднее, представлены на рис. 7.10. Размеры частиц варьируются от 3 до 70 мкм. Наиболее крупные образования являются результатом слипания более мелких, что сказывается на нестехиометрическом химическом составе таких частиц. Практически во всех частицах содержится Fe (от 4 до 61 %), преимущественно в оксидной форме. В семи Fe-содержащих частицах обнаружены примеси Ni — от 3 до 23 % и V — от 2 до 96 %. Одна из частиц почти полностью состоит из оксида V, а Fe является примесью. Элементное картирование поверхности обнаруженных образований позволило выявить участки наибольшей концентрации Fe, V и Ni (рис. 7.11).

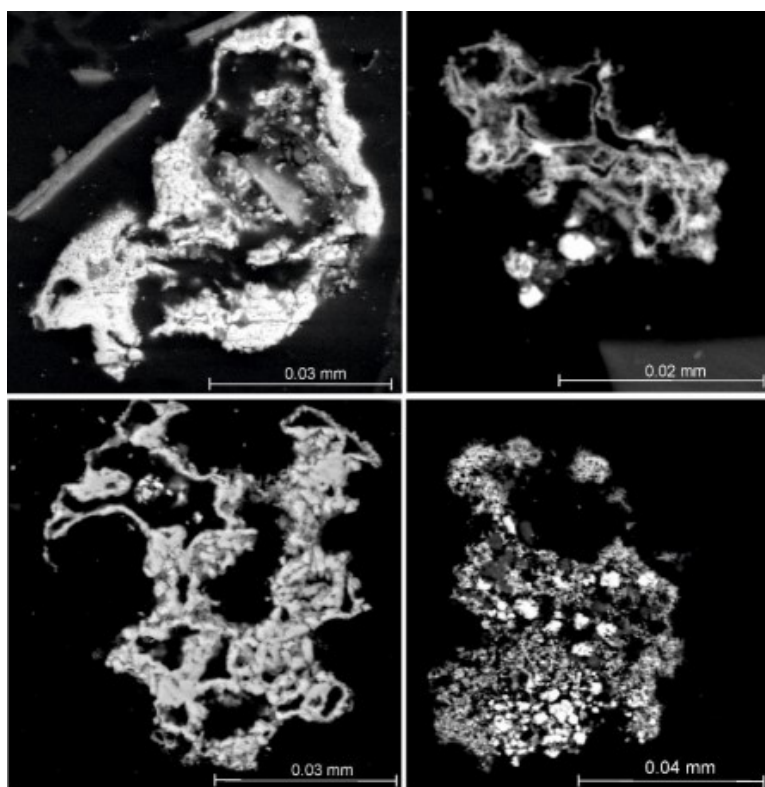


Рис. 7.10. Техногенные частицы из снежного покрова оз. Среднее, г. Мурманск (Trace element..., 2021)

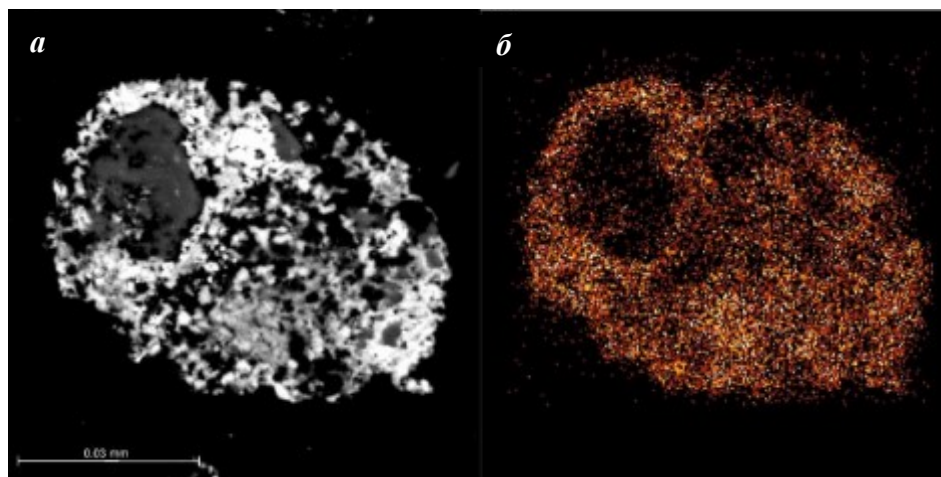


Рис. 7.11. Одна из техногенных частиц (а) с картированием областей наибольших концентраций ванадия (б) (Trace element..., 2021)

Результаты исследования позволили косвенно судить о формах соединений, в которых основные загрязнители поступают в водные экосистемы. Содержащие V и Ni частицы являются результатом неполного сгорания или термического разложения углеводородов летучей золой, образовавшейся в результате деятельности городской ТЭЦ. Такой тип выбросов характерен для производств, сжигающих топливо, содержащее тяжелые металлы в виде микропримесей. Оксиды Fe-Ni-Cu и сульфиды Ni-Cu-Fe-Co были также обнаружены другими исследователями в снежных пробах ряда городов Мурманской области — Мончегорске, Заполярном и Никеле (Mineralogy..., 1999). Их состав и строение указывают на то, что их источником являются медно-никелевые предприятия.

Анализ форм нахождения редких элементов в колонках донных отложений озер Семеновское, Окуновое, Среднее, Северное, Ледовое показал, что большинство элементов преимущественно закреплены в наиболее устойчивых соединениях (фракция 5). В верхних, наиболее современных, слоях (0–15 см) отложений оз. Окуновое наблюдается увеличение роли остаточной фракции Zn (с 14 % в слое 15–20 см до 55 % в слое 0–5 см), что коррелирует с одновременным возрастанием (в 12 раз — с 39 до 480 мг/кг) валового содержания этого металла. Преобладание остаточной фракции большинства металлов свидетельствует о том, что элементы в донных осадках в основном находятся в труднодоступных соединениях. Они могут попадать в отложения как от природных источников (кристаллическая структура первичных и вторичных минералов, унаследованных от горных пород, слагающих территорию водосборов озер), так и в результате антропогенной деятельности (частицы шлака, техногенной пыли и других устойчивых компонентов). Анализ частиц с ледового покрова оз. Среднее показал, что поллютанты (V и Ni) попадают в водную среду от техногенных источников в виде труднорастворимых твердофазных соединений — оксидов. Такие формы большинства металлов при поступлении в окружающую среду, в отличие, например, от солей, проходят первоначально самую медленную стадию — растворение. Она может занимать от полугода до десятков лет, прежде чем

элементы будут вовлечены в дальнейшие процессы биогеохимической трансформации соединений (Voegelin et al., 2005, Ladonin, Karpukhin, 2011).

С наиболее устойчивыми органоминеральными соединениями (фракция 3) также оказалось ассоциировано значительное количество анализируемых элементов (проценты от валового содержания): V — 20–55 %; Sn — 20–50 %; Ni — 4–20 %; Cr — 8–30 %; Cu — 10–35 %; Pb — 10–25 %; Sb — 20–50 %; Zn — 12–60 %. Наибольшее сродство металлов к данной фракции проявлено в озерах Окуневое и Среднее, наименьшее — в оз. Ледовое (рис. 7.12). В озерах Среднее и Северное на фоне значительного увеличения валового содержания большинства проанализированных элементов в наиболее современных осадках заметно растет и абсолютное количество V, Ni, Cu, Cd, Sb и Zn, связанное с органическим веществом. При этом процентная доля остается достаточно стабильной на всей глубине колонок. В отложениях озер Семеновское и Окуневое наиболее современные слои обогащены тяжелыми металлами, а роль органики в связывании большинства элементов остается достаточно стабильной как в отношении абсолютного количества, так и в процентной доле. Исключением являются V, Zn и Pb: в верхних слоях (0–10 см) колонки из оз. Окуневое увеличивается абсолютное содержание металлов в данной фракции. В то же время процентное содержание данной фракции металлов в донных осадках оз. Ледовое остается стабильно низким на всей глубине колонки (рис. 7.12). Согласно исследованию (The Hydrochemistry..., 2020), отложения изученных озер г. Мурманска относят к органическим или органосиликатным осадкам (содержание рассеянного органического вещества варьирует от 18 до 45 %).

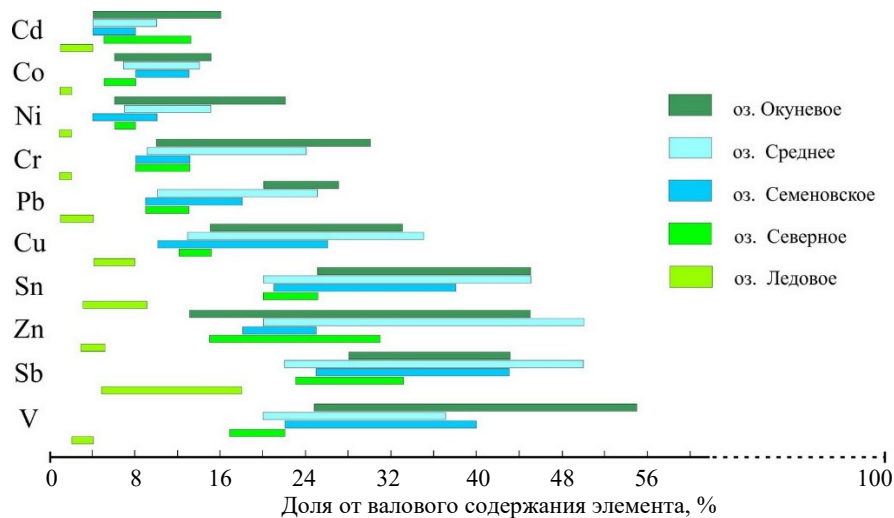


Рис. 7.12. Доля тяжелых металлов и металлоидов, связанных в органоминеральные соединения донных отложений озер (диапазон на всей глубине колонок)

Образование устойчивых комплексов ионов металлов с гумусовыми кислотами является одним из важнейших механизмов закрепления металлов в донных отложениях водных объектов (Belzile et al., 1997; Lopez et al., 2010; Remediation..., 2021). Аналогично, Sb, Mo и Cu тесно связаны с органическим веществом и в донных отложениях оз. Комсомольское, которое расположено



в центре г. Мончегорска (Мурманская область) и находится в зоне влияния медно-никелевого комбината (Fraction..., 2019). Схожее геохимическое поведение тяжелых металлов и металлоидов наблюдалось также для малых озер урбанизированной среды Республики Карелии (Слуковский, Даувальтер, 2020), геологическое строение в значительной степени сходно со строением Мурманской области. Важно отметить, что гумусовые кислоты способны образовывать с металлами наиболее устойчивые комплексные соединения (хелаты). Данный процесс снижает потенциальную токсичность поллютантов (Suffet, MacCarthy, 1989; Remediation..., 2021). Таким образом, органическое вещество донных отложений озер г. Мурманска может являться одним из основных буферных накопителей металлов при потенциальном увеличении уровня их техногенного поступления в аквальные экосистемы.

С гидратированными оксидами Fe и Mn (фракция 4) преимущественно ассоциированы: Cd — 1–26 %; Zn — 2–30 %; Ni — 3–12 %; Pb — 2–4 %; Cu — 1–8 %. При этом в наиболее современных слоях (0–10 см) колонок озер Семеновское и Среднее с увеличением валового содержания Cd и Pb возрастает их абсолютное количество в данной фазе, а также относительная доля (проценты от валового содержания): в оз. Семеновское — с 3–4 (0,07 мг/кг) до 15–17 % (0,3 мг/кг), в оз. Среднее — с 1–3 (0,01 мг/кг) до 20 % (0,8 мг/кг). Гидроксиды Fe и Mn — сильные поглотители металлов в донных отложениях (Turner, 2000), такие соединения относительно устойчивы, однако при понижении Eh токсичные металлы могут высвобождаться в восстановительную область. В отложениях малых озер южной Карелии (Слуковский, Даувальтер, 2020), как и озер г. Мурманска, гидратированные оксиды Fe и Mn преимущественно связывают Cd, Zn, Ni и Pb, но не более 12 % от валового содержания большинства металлов и металлоидов, а в мурманских озерах это значение достигает 20 %.

Наиболее подвижными формами металлов являются обменные (фракция 1) и специфически сорбированные (фракция 2), их содержание (процентное) учитывается при расчете риска вторичного загрязнения водоема. В обменно-поглощенном состоянии катионы металлов могут десорбироваться при изменениях ионного состава вод озера. Под специфически сорбированными формами (фракция 2) понимаются металлы и металлоиды, которые связаны с компонентами донных осадков за счет неионных связей. Металлы входят в состав карбонатных соединений, поверхностных комплексов и поверхностных осадков, на данном этапе также происходит извлечение ассоциированных с легкоразлагаемым органическим веществом металлов. Наиболее мобильными (фракция 1) в городских озерах являются: Ni (17–30 %) > Cd (1–26 %) > Mn (5–23 %) > Zn (2–23 %) > Co (2–23 %). В то же время для Cd, Pb, Sb, Zn, Cu, V выявлен самый высокий уровень обогащения верхних слоев донных осадков во всех озерах, но наибольшее количество подвижных форм (сумма 1-й и 2-й фракций) обнаружено для Zn, Ni и Cd. Напротив, для V и Pb, на фоне сильного превышения валового содержания над фоном и кларком земной коры, характерна низкая мобильность во всех озерах (доля обменных форм не превышает 2 % для V и 4 % для Pb). В озерах Семеновском и Северном в наиболее современных слоях отложений (0–10 см) подвижность Zn, Ni и Cd снижается как в процентном, так и в абсолютном отношении. Максимальное количество мобильных фракций обнаружено в слоях 10–20 и 10–25 см в озерах Семеновское и Северное соответственно. В верхних слоях отложений оз. Окуновое наблюдается возрастание абсолютного количества

подвижных форм, однако их доля (%) остается достаточно стабильной по всей глубине колонки. Озеро Среднее, в свою очередь, отличается пониженной миграционной способностью большинства элементов по всей глубине колонки (менее 1 % обменных форм для Co, Ni, Cd, Mn и до 7 % (10 мг/кг) для Zn). Подвижность Zn, Ni и Cd в осадках оз. Ледовое достаточно стабильна по всей глубине колонки отложений.

Невысокая относительная мобильность (согласно результатам расчета индекса RAC) большинства элементов даже в самых загрязненных слоях озерных осадков говорит о высокой буферности отложений и их способности связывать загрязнители в устойчивые комплексы, в том числе органоминеральные (табл. 7.3). С другой стороны, такие поллютанты, как V и Ni, в окружающую среду г. Мурманска поступают от антропогенных источников в виде малорастворимых твердофазных оксидов. Таким образом, форма поступления загрязнителей наряду с другими факторами может существенно влиять на фракционный состав, а также на мобильность химических элементов.

Таблица 7.3

Результаты расчета риска вторичного загрязнения  
для донных отложений по индексу RAC

Озеро	RAC (% подвижных форм в слое 0–10 см, степень риска)	Химический элемент
Семеновское	< 1 %, отсутствие	V, Cr, Sn
	1–10 %, низкая	Ni, Cu, Cd, Sb, Pb
	10–30 %, средняя	Mn, Co, Zn,
Среднее	< 1 %, отсутствие	V, Cr, Sn, Sb
	1–10 %, низкая	Co, Ni, Cu, Cd, Pb
	10–30 %, средняя	Mn, Zn
Северное	< 1 %, отсутствие	V, Pb, Sn
	1–10 %, низкая	Cr, Co, Ni, Cu, Cd, Sb, Zn
	10–30 %, средняя	Mn
Окуневое	< 1 %, отсутствие	Pb
	1–10 %, низкая	V, Cr, Cu, Sb, Sn
	10–30 %, средняя	Mn, Co, Ni, Zn, Cd
Ледовое	< 1 %, отсутствие	V, Sn, Pb
	1–10 %, низкая	Cr, Cu, Sb
	10–30 %, средняя	Mn, Ni, Zn, Cd

Стоит отметить, что химическим элементам, имеющим значительное превышение валового содержания над природным фоном территории, следует уделять особое внимание при дальнейшем эколого-геохимическом мониторинге городских озер. Высокие концентрации токсичных металлов создают серьезную потенциальную опасность для водной экосистемы, так как миграционная способность токсичных металлов может существенно возрастать при изменениях физико-химических параметров среды, особенно в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки на урбанизированные территории Арктической зоны.

Фракционный анализ донных отложений озер (Семеновское, Среднее, Северное, Окуновое и Ледовое) показал, что редкоземельные элементы также преимущественно ассоциированы с наиболее устойчивыми соединениями (рис. 7.13). Остаточная фаза (фракция 5) составляет от 40 до 90 % валового содержания. Наиболее существенная роль в накоплении редкоземельных элементов показана для отложений озер Семеновское и Ледовое, в них же обнаружены наиболее высокие средние валовые содержания данных элементов.

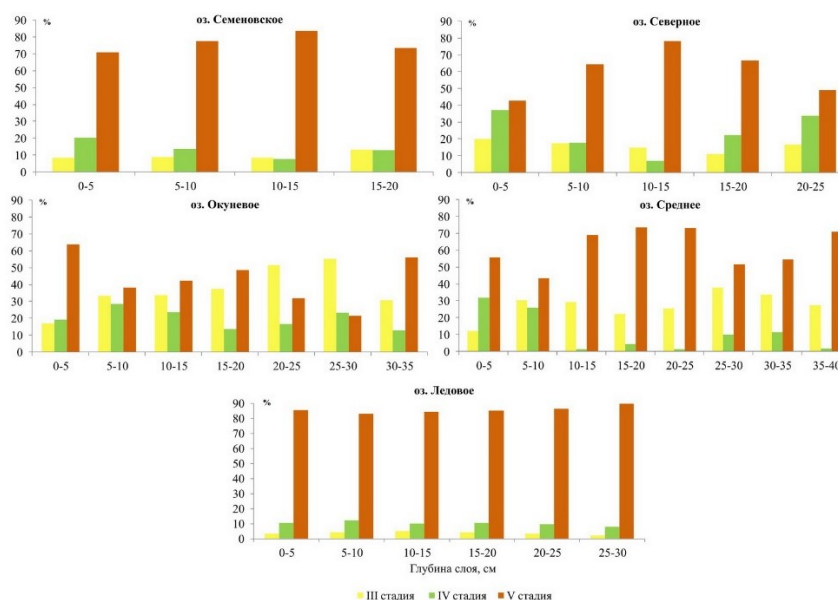


Рис. 7.13. Содержание наиболее устойчивых форм редкоземельных элементов в донных отложениях г. Мурманска (стадия 3 ассоциирована с гумусовым веществом; стадия 4 связана с гидроксидами Fe и Mn; стадия 5 — остаточная, связанная с кристаллической структурой минералов)

Стабильные органоминеральные комплексы с РЗЭ (фракция 3) являются следующей преобладающей фракцией в отложениях озер Окуновое и Среднее, при этом их роль снижается в наиболее современных слоях колонок. В донных отложениях остальных озер фракция, ассоциированная с гидратированными оксидами Fe и Mn (13–51 %), начинает преобладать над органическим веществом (9–38 %) практически по всей глубине колонок.

Подвижность редкоземельных элементов в донных отложениях изученных озер очень низкая как по абсолютному содержанию, так и по относительной доле. Суммарно потенциально подвижные фракции (фракция 2 и 3) составляют менее 1 % от валового содержания по всей глубине колонок во всех исследованных озерах.

Таким образом, РЗЭ поступают в аквальные экосистемы городских в виде устойчивых соединений. Кроме того, при возможной дальнейшей биогеохимической трансформации таких соединений, редкоземельные элементы закрепляются в устойчивые комплексы с твердофазными компонентами донных отложений. Подвижность редкоземельных элементов остается стабильно низкой даже в наиболее загрязненных слоях всех проанализированных колонок донных отложений озер.

*Содержание нефтяных углеводородов в донных отложениях.* Для определения содержания нефтяных углеводородов в 2019–2021 гг. взяты образцы отложений из семи озер г. Мурманска. Полученные результаты анализа образцов из колонок осадков размещены в табл. 7.4, а на рис. 7.14 графически представлены данные о содержании нефтяных углеводородов в слое отложений 0–5 см.

Таблица 7.4

Содержание\* нефтяных углеводородов в отложениях озер г. Мурманска

Место отбора (озеро)	Тип отложений	Глубина, см	Содержание углеводородов, мг/кг	Степень загрязнения ДО*
Безымянное (Северное)	Органосиликатный	0–5	2413±507	Слабозагрязненные
		5–10	2616±549	
		10–15	1955±411	
		15–20	1644±345	
		39–43	460±345	Чистые
Семеновское	То же	0–5	1652±347	Слабозагрязненные
		5–10	1701±357	
		10–15	2966±623	
		15–20	3398±714	Умеренно загрязненные
Среднее	«	0–5	1251±263	Слабозагрязненные
		5–10	684±144	
		15–20	136±29	Чистые
		20–25	207±43	
		25–30	272±57	
		30–35	107±22	
		35–40	76±16	
Окуновое	«	0–5	936±196	Слабозагрязненные
		5–10	1036±218	
		10–15	1111±233	
		20–25	797±167	
		25–30	762±160	
		30–35	338±71	Чистые
		33–37	307±65	
Ледовое	Органожелезистый	0–5	17151±2573	Опасно загрязненные
		5–10	20954±3143	
		10–15	24823±3723	
		15–20	17523±2628	
		20–25	25037±3756	
		25–30	14116±2117	

\* Согласно региональному нормативу «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» от 22 июля 1996 г.

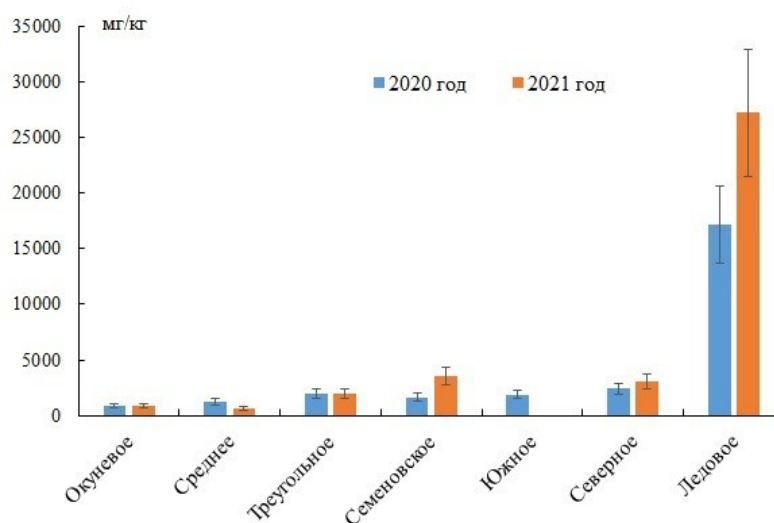


Рис. 7.14. Содержание углеводородов в верхнем слое (0–5 см) донных отложений озер г. Мурманска

Максимальное содержание нефтяных углеводородов отмечено в отложениях озер Ледовое, Северное, Южное и Семеновское, которые находятся вблизи оживленных автомобильных дорог и испытывают большую антропогенную нагрузку, при этом для оз. Семеновское характерно увеличение содержания нефтяных углеводородов в слое донных отложений 10–20 см (рис. 7.15).

Распределение нефтяных углеводородов по глубине в колонках отложений может свидетельствовать о наличии определенных исторических периодов, когда проходило интенсивное накопление углеводородов. Например, при исследовании донных отложений залива Клайд (Шотландия) период доиндустриальной революции и современные отложения характеризовались низкими концентрациями углеводородов и поверхностно-активных веществ (ПАВ), а также высокой относительной распространенностью биогенного фенантрена и нафталина. Индустриализация привела к увеличению концентрации ПАВ и изменению соотношения изомеров, характерных для травы/дерева/угля и для нефти (образующиеся при сжигании). Повышение концентрации углеводородов и снижение содержания ПАВ отражало сокращение использования угля и увеличение зависимости от нефтяного топлива примерно с 1950-х гг. (Chemical signatures..., 2011). Схожие тенденции были установлены при исследовании отложений озер в Норвегии. Содержание в отложениях полихлорированных бифенилов (ПХБ), дихлордифенилтрихлорэтана и их метаболитов увеличивалось примерно с 1930 до 1970 гг. Поведение большинства металлов (As, Cd, Co, Ni и Zn) показало аналогичную картину, как и в случае ПХБ. Для Cr, Pb и V четких тенденций не наблюдалось. Содержание Hg постепенно увеличивалось с начала индустриальной эры (Historical..., 2007).

В отложениях озер Среднее и Окуновое содержание нефтяных углеводородов было заметно ниже и не превышало 1251 мг/кг (рис. 7.16). Данные озера, находясь на некотором удалении от потенциальных источников загрязнения, испытывают меньшую антропогенную нагрузку.

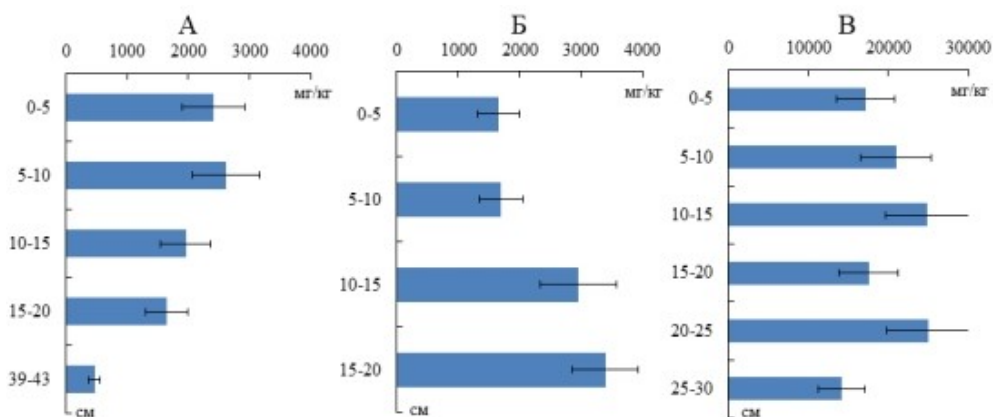


Рис. 7.15. Содержание нефтепродуктов в донных отложениях озер Северное (А), Семеновское (Б) и Ледовое (В)

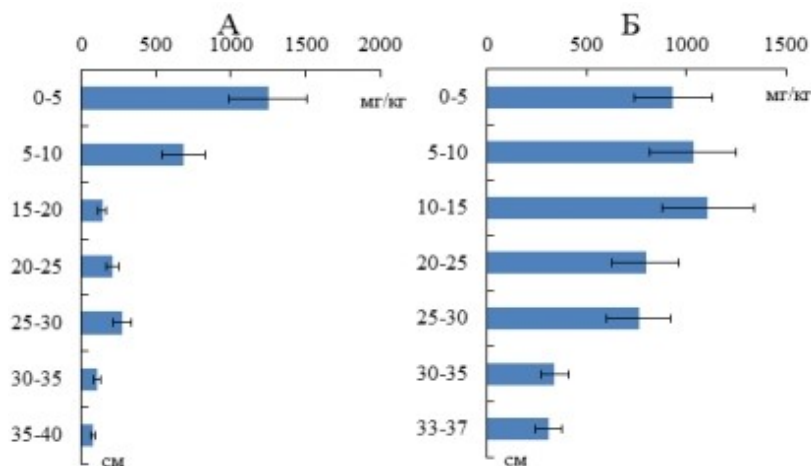


Рис. 7.16. Содержание нефтепродуктов в донных отложениях озер Среднее (А) и Окуновое (Б)

С глубиной в колонках изученных донных отложений мурманских озер отмечается снижение концентрации нефтяных углеводородов, например, в образцах донных отложений оз. Среднее, взятых с глубины более 25 см, их содержание не превышает  $272 \pm 57$  мг/кг, а в оз. Окуновое —  $762 \pm 160$  мг/кг. В образцах донных отложений этих же озер, но взятых с глубины 35–40 см, содержание нефтепродуктов составляет от 76 до 307 мг/кг.

В поверхностных слоях осадков Кольского залива ранее были отмечены схожие концентрации нефтяных углеводородов — 1615 мг/кг (среднее гармоническое содержание гексанрастворимых нефтяных углеводородов), что является самым высоким на Северо-Западе России значением. Наиболее высокой концентрацией нефтяных углеводородов характеризовались участки, расположенные в южном и среднем колене, в районе Североморска (до 2375 мг/кг) (Шахвердов, Шахвердова, 2016). Можно сказать, что содержание нефтяных углеводородов в отложениях озер г. Мурманска сравнимо с таковым в отложениях

Кольского залива Баренцева моря, за исключением оз. Ледовое, которое отличается экстремально высоким содержанием углеводородов.

Для оценки степени загрязнения нефтяными углеводородами отложений мурманских озер необходимо сопоставить полученные результаты с нормативными величинами ПДК или фоновым содержанием нефтяных углеводородов в исследуемом регионе.

Нормативы содержания нефтяных углеводородов в донных отложениях для Мурманской области на сегодняшний день не разработаны. Однако подобные нормативы существуют для отдельных регионов России. Так, если опираться на Постановление Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры от 10 ноября 2004 г. № 441п «Об утверждении регионального норматива “Предельно допустимый уровень содержания нефти и нефтепродуктов в донных отложениях поверхностных водных объектов на территории Ханты-Мансийского автономного округа — Югры”», обследованные озера г. Мурманска можно отнести к водным объектам с резким угнетением донной экосистемы, так как содержание нефтяных углеводородов в отложениях превышает 500 мг/кг.

Согласно новому Постановлению Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры от 23 ноября 2018 г. № 432п «О нормативе “Допустимое остаточное содержание нефти и нефтепродуктов в донных отложениях после проведения восстановительных работ на водных объектах Ханты-Мансийского автономного округа — Югры”», которое вступает в силу в 2022 г., допустимое содержание нефтяных углеводородов в минеральных отложениях составляет 200 мг/кг, в органических — 4000 мг/кг, в смешанных — 560 мг/кг. Если руководствоваться данным документом, то содержание нефтяных углеводородов в верхних слоях осадков озер г. Мурманска превышает установленные нормативы в несколько раз.

Согласно региональному нормативу «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» от 22 июля 1996 г. выделяется четыре класса загрязненности отложений: слабозагрязненные (180–1000 мг/кг); умеренно загрязненные (1000–3000 мг/кг); сильно загрязненные (3000–5000 мг/кг); опасно загрязненные (более 5000 мг/кг). Однако эти концентрации справедливы только для «стандартных» донных отложений (10 % органического вещества и 25 % глинистой фракции). Для пересчета концентрации загрязняющих веществ в «нестандартных» осадках используют специальные формулы. Согласно полученным значениям, озера г. Мурманска относятся к слабозагрязненным (Среднее, Окуневое, Южное и Треугольное), умеренно загрязненным (Семеновское, Северное) и опасно загрязненным (Ледовое).

Рассматривая опыт зарубежных стран, можем упомянуть несколько наиболее часто используемых документов, устанавливающих нормы содержания нефтяных углеводородов в донных отложениях. Так, отложения Персидского залива по содержанию нефтяных углеводородов подразделяют на незагрязненные (10–15 мг нефтяных углеводородов/кг), слабозагрязненные (15–50 мг/кг), умеренно загрязненные (50–200 мг/кг) и сильно загрязненные (более 200 мг/кг) (Bottom sediments..., 1996). В Нигерии донные отложения считают незагрязненными при содержании нефтяных углеводородов менее 50 мг/кг, загрязненными — 50–5000 мг/кг, сильно загрязненными, требующими очистки — более 5000 мг/кг (Soil/Sediment..., 2002). В Канаде донные отложения относят к загрязненным,

если содержание нефтяных углеводородов превышает 500 мг/кг (Atlantic RBCA..., 2015).

При отсутствии установленного норматива уровень загрязнения донных отложений можно оценить по фоновым показателям содержания нефтепродуктов. Для этого был проведен анализ содержания нефтяных углеводородов в донных отложениях нескольких озер на территории Мурманской области и Республики Карелия, которые не испытывают антропогенную нагрузку и находятся на удалении от городов и промышленных предприятий. Данные, полученные в результате анализа проб, представлены в табл. 7.5.

Содержание органических соединений, идентифицируемых как нефтепродукты, в донных отложениях фоновых озер Мурманской области и Карелии достигает значений  $1091 \pm 229$  мг/кг, что, согласно разработанному нормативу для г. Санкт-Петербург, характеризует водоем как слабозагрязненный. В то же время среди обследованных озер два из них по содержанию нефтяных углеводородов в отложениях относятся к чистым. Таким образом, мы сталкиваемся со сложностью интерпретации результатов определения содержания углеводородов, где большую роль играет содержание органического вещества в образце.

Таблица 7.5

Содержание нефтяных углеводородов в отложениях некоторых озер Мурманской области и Республики Карелия (для сравнения)

Место отбора (озеро), координаты	Тип отложений	Углеводороды, мг/кг	Уровень загрязнения ДО*
Мурманская область			
Малое Лендозеро 66.806323°, 34.185631°	Минеральный осадок или диатомит	879±185	Слабо- загрязненный
Комсомольское 67.936206°, 32.950761°	Органоминеральный сапропель	983±206	
Портлубол 69.200542°, 32.299189°	Минеральный осадок	123±48	Чистый
Республика Карелия			
Перманто 65.735556°, 31.351167°	Органоминеральный или диатомовый сапропель	548±115	Чистый
Безымянное 65.720833°, 31.300417°		1091±229	Слабо- загрязненный

\* Согласно региональному нормативу «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» от 22 июля 1996 г.

Контроль нефтяных загрязнений по нефтяным углеводородам может выявить углеводородное загрязнение неантропогенного генезиса. Такие ситуации связаны с природными углеводородными аномалиями, присущими торфяно-болотным образованиям, черноземным агроценозам, гидросистемам замедленного водообмена и т. п., воспринимаемым как нефтяные. Исследования различных почв показали, что количество битуминозных веществ сингенетического органического вещества может достигать до 100 г/кг, а доля



нефтяных углеводородов — до 10 г/кг и более. При выщелачивании торфяных почв с 1 кг почвы выносятся 24–920 мг хлороформенного битумоида, в том числе 6–130 мг нефтяных углеводородов. При исследовании отложений оз. Чини (Малайзия) было установлено, что n-алканы, сохраняющиеся в отложениях озера, имеют преимущественно биогенное происхождение (воскоподобные соединения высших растений и микроорганизмов) (Variations..., 2011). Источниками алифатических углеводородов в отложениях оз. Чаоху (Китай) были главным образом высшие растения (31 %), сжигание ископаемого топлива (30 %), нефтепродукты (26 %) и фитопланктон (19 %) (Wang et al., 2012). Углеводороды в отложениях оз. Крейтер также имеют как биогенное (воскоподобные соединения наземных растений и водоросли), так и антропогенное происхождение (нефтепродукты) и попадают в водоем посредством прямого поступления и атмосферного переноса. Количество n-алканов природного происхождения составляет до 240 мг/кг (Oros et al., 2007).

Высокие фоновые концентрации углеводородов в органогенных и органоинеральных отложениях озер Мурманской области и Карелии могут быть обусловлены наличием большого количества слабоминерализованного органического вещества авто- и аллохтонного происхождения. Зачастую подобные органические соединения при валовом определении углеводородов методом ИК-спектрии идентифицируются как нефтепродукты.

Таким образом, содержание органических веществ, идентифицируемых как нефтепродукты методом ИК-спектрии, в ДО озер, не испытывающих антропогенной нагрузки, достигает 1000 мг/кг. Это значение многократно превышает фоновые концентрации, установленные для других регионов. Так, фоновая концентрация нефтяных углеводородов в осадках Онежского озера не превышает 50 мг/кг (Белкина и др., 2008), а в водоемах Республики Татарстан оценивается в 50–80 мг/кг (Донные..., 2011; Иванов, 2012). Рассчитанное фоновое содержание нефтяных углеводородов в отложениях озер Мурманской области в целом составляет 32 мг/кг (Шахвердов, Шахвердова, 2016), что также во много раз ниже полученных нами результатов.

Мы видим, что нормативы содержания нефтяных углеводородов в отложениях, разработанные для других регионов, дают неоднозначную оценку загрязнения озер г. Мурманска. Также не совсем корректно использовать для оценки степени загрязненности фоновые содержания нефтяных углеводородов в отложениях озер других регионов, различающихся по гранулометрическому составу и содержанию органического вещества.

## Глава 8 ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕР

**Численность и структура бактериоценоза озер г. Мурманска.** Пресные водоемы отличаются как большим разнообразием и изменчивостью химического состава, так и микробиологическим разнообразием авто- и аллохтонной микробиоты. Гетеротрофный бактериопланктон является весьма многочисленным, метаболически и таксономически разнообразным компонентом водных экосистем. Он служит связующим звеном между растворимыми органическими соединениями и консументами в пищевых сетях, играет ключевую роль в минерализации органических веществ и круговороте элементов (Кузнецов и др., 1985; Романенко, 1985). Микроорганизмы, в особенности гетеротрофные бактерии, характеризуются огромными адаптационными возможностями и могут корректировать свои параметры, такие как численность и структура водных бактериоценозов, при изменении условий внешней среды (Бульон, 1998; Планктонные..., 2012; Богданова, 2015, Акулова, 2017). Бактериопланктон принимает участие в формировании качества поверхностных и подземных вод, так как осуществляет разложение и детоксикацию органических и неорганических загрязняющих веществ (Закономерности..., 1994; Прыткова, 2002; Широкова, 2007). Исследования совокупности микробиологических характеристик водных экосистем, развития в воде микробного сообщества могут помочь оценить уровень трофности пресноводных водоемов Кольского Севера и дать возможность прогнозирования процессов его естественного очищения.

Количественное соотношение трофических групп бактерий создает картину четкого разделения озер с помощью микробиологической индикации на три типа: эвтрофный, мезотрофный и олиготрофный (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Трофический статус водоема в зависимости от общей численности бактерий  
(по Романенко, 1985)

Типизация водных объектов		Общее число бактерий, млн кл/мл
по Тинеману и Науману	с расширенным интервалом	
Олиготрофный	Ультраолиготрофный	0,01–0,05
	Олиготрофный	0,05–0,18
	Олиготрофно-мезотрофный	0,18–0,50
Мезотрофный	Мезотрофный	0,50–1,38
	Мезотрофно-эвтрофный	1,38–3,80
Эвтрофный	Эвтрофный	3,80–10,50
	Гиперэвтрофный	10,50–30,00
Дистрофный	Дистрофный	0,50–3,00
	Умеренно-дистрофный	1,50–2,00

Распределение гетеротрофных микроорганизмов в водных экосистемах является результатом взаимодействия биологических и абиотических факторов среды, поэтому подвержено постоянным изменениям (Сезонная..., 1986).

Известно, что границы количественных изменений общего числа бактерий (ОЧБ) в водоеме обычно не превышают величин одного порядка, при этом они значительно уже, чем колебания численности эвтрофных бактерий, размах которых может составлять от двух до трех порядков. Таким образом, ОЧБ является наиболее консервативным показателем, в то время как численность гетеро- и олиготрофных бактерий — более реактивным. Следовательно, одного отдельно взятого параметра для характеристики состояния микробного сообщества водоема зачастую недостаточно и более информативными в этом случае часто являются коэффициенты, отражающие соотношение величин двух или более микробиологических показателей. Наиболее часто в качестве дополнительного параметра для характеристики трофности водной экосистемы и состояния обитающих в ней бактериоценозов используется соотношение между значениями ОЧБ и численностью гетеротрофов — коэффициент Разумова ( $K_{\text{Раз}}$ ) (Кузнецов, 1952).

В. В. Ильинским (2000) было предложено для общей характеристики состояния микробного сообщества в морских и пресноводных акваториях разных широт использовать индекс  $K_{\text{И}}$ . Он рассчитывается как отношение суммарной численности сапротрофных и факультативно олиготрофных бактерий по посевам к ОЧБ по прямому счету. Эта модификация коэффициента Разумова объяснялась В. В. Ильинским тем, что суммарная численность сапро- и олиготрофных бактерий более полно отражает численность той части гетеротрофного бактериопланктона, которая способна к росту на питательных средах, чем только численность сапротрофов. Причина заключается в том, что сапротрофы не везде являются доминирующей группой культивируемых бактерий и в ряде случаев таковой могут быть олиготрофные микроорганизмы. В широком ряде исследований водных объектов В. В. Ильинским было показано, что высокая величина индекса  $K_{\text{И}}$  свидетельствует о высоких темпах размножения гетеротрофных бактерий, что имеет место при благоприятных условиях для их развития и в первую очередь при обилии лабильного органического вещества в водной среде. После его исчерпания бактерии переходят в состояние голодания-выживания, а темпы их размножения резко падают, чему соответствуют низкие значения  $K_{\text{И}}$ .

Отношение числа гетеротрофов к общему числу бактерий — индекс сапробности, выраженный в процентах, является стандартной характеристикой санитарного состояния водоема (табл. 8.2). Чем чище вода, тем больше разница между показателями численности. В практически чистых водах гетеротрофы составляют порой  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  % от общего числа бактерий (Rheinheimer, 1992).

Таблица 8.2

Характеристика воды по коэффициенту сапробности

Характеристика воды	Особо чистая	Чистая	Грязная	Особо грязная
$K_{\text{сапр}}$ , %	Не более 0,03	0,03	0,30	3,00

Численность различных трофических групп бактерий в водоемах Кольского полуострова колеблется в достаточно широких пределах — от  $10^1$  до  $10^4$  кл/мл и во многом определяется такими факторами, как температура воды, содержание органического вещества, степень эвтрофирования, развитие

фитопланктона и др. Так, в оз. Имандра в разные годы исследований численность бактериопланктона колебалась от 10 до 200 кл/мл (Евдокимова 1988, Современное состояние..., 2020). Микробиологические исследования, выполненные на таких озерах, как Кумужье, Травяное, Сопчъявр, Нюдъявр, показали, что численность гетеротрофных бактерий в водной толще этих водоемов не превышает 4000 кл/мл. Исследования озер, входящих в систему Верхнетуломского водохранилища, таких как Ечозеро, Кодъявр, Лотм, Няльявр и др., выполненные в период с 2006 по 2007 гг., показали достаточно высокую численность гетеротрофных бактерий ( $10^3$ – $10^4$  кл/мл), что сопоставимо с численностью бактериопланктона озер средней полосы (Вагнер, Дмитриева, 2004; Богданова, 2015; Акулова, 2017). Еще более высокие значения численности бактерий выявлены в поверхностном слое озер Семеновское и Ледовое: гетеротрофная составляющая достигала 300–480 тыс. кл/мл (Перетрухина, 2014).

Средние данные численности сапро- и олиготрофной групп бактерий в воде озер г. Мурманска представлены на рис. 8.1. Так, максимальная численность сапротрофных бактерий была отмечена в оз. Ледовое, она составила 680 кл/мл. Максимальная численность олиготрофной составляющей бактериального сообщества наблюдалась в озерах Ледовое и Южное. Минимальная численность как сапротрофов, так и олиготрофов была отмечена в оз. Среднее, она составила 83 и 51 кл/мл соответственно. Следует отметить, что разница в численности между сапро- и олиготрофной группами бактерий достоверно значима только для оз. Северное. Здесь можно говорить о преобладании аллохтонной микробиоты, поступающей в водоем с различными источниками загрязнения, по отношению к автохтонным микроорганизмам, обитающим в водной среде.

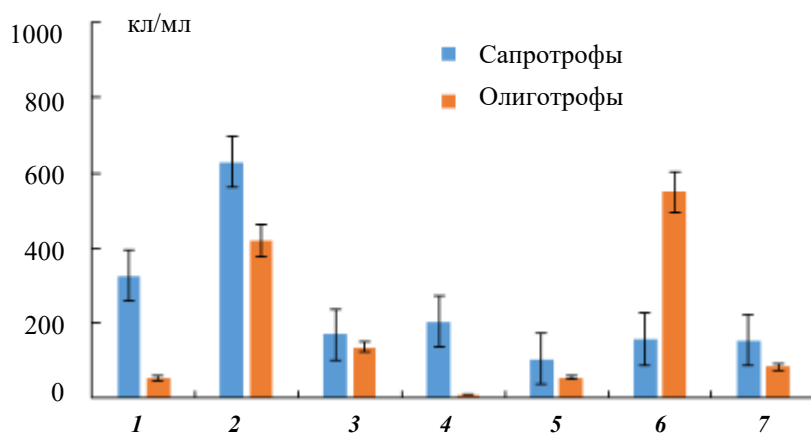


Рис. 8.1. Численность бактерий (кл/мл) исследуемых трофических групп в воде озер г. Мурманска (2020 г.): 1 — Северное; 2 — Ледовое; 3 — Окуневое; 4 — Семеновское; 5 — Среднее; 6 — Южное; 7 — Треугольное

Исследование, выполненное в 2021 г., показало те же тенденции в изменении численности бактерий для различных озер Мурманска, но разброс в показателе численности основных групп бактерий был более сильно выражен. Так, в оз. Ледовое он был максимальной и достигал 8200 кл/мл, что на порядок превышает результат 2020 г. Аллохтонная микробиота стала преобладать

над автохтонными микроорганизмами. Бактериальная численность в оз. Среднее снизилась до 15 кл/мл, что в 3–5 раз ниже данных 2020 г.

Результаты определения общей численности бактерий представлены в табл. 8.3, что позволяет получить представление о численности всех групп бактерий, в том числе и некультивируемых на питательных средах.

Таблица 8.3

Общая численность и биомасса бактерий в воде  
и донных отложениях озер г. Мурманска

Озеро	Общая численность, 10 <sup>6</sup> кл/г				Биомасса, мкг/г			
	Вода		Ил		Вода		Ил	
	2020 г.	2021 г.	2020 г.	2021 г.	2020 г.	2021 г.	2020 г.	2021 г.
Северное	0,4±0,01	0,8±0,11	1000±40	7800±89	0,017±0,004	–	40±7	30±6
Ледовое	0,6±0,09	2,2±0,31	560±33	6300±67	0,026±0,003	0,09±0,009	22±4	30±2
Окуновое	0,4±0,09	0,7±0,09	1300±75	7300±97	0,014±0,002	0,03±0,004	50±3	35±3
Семеновское	0,9±0,13	0,7±0,05	1200±37	8100±68	0,036±0,003	0,03±0,005	48±3,8	34±4
Среднее	0,4±0,01	0,6±0,03	1000±48	–	0,015±0,004	0,02±0,006	40±5,2	–
Южное	1,6±0,18	0,6±0,04	1300±98	–	0,63±0,075	0,02±0,003	52±6,2	–
Треугольное	1,2±0,11	0,6±0,08	1500±99	6700±57	0,50±0,088	0,02±0,003	60±7	27±5
Портлубол	–	0,4±0,02	–	9200±96	–	0,02±0,002	–	40±9

На основании полученных в 2020 г. данных озера г. Мурманска по показателю трофического статуса водоема можно расположить следующим образом: Северное, Окуновое и Среднее — олиготрофно-мезотрофный тип; Ледовое, Семеновское и Треугольное — мезотрофный тип; Южное — мезотрофно-эвтрофный тип.

Данные 2021 г. показывают, что к олиготрофно-мезотрофному типу можно отнести только оз. Портлубол (50 км от г. Мурманска). Остальные озера, которые ранее мы отнесли к олиготрофно-мезотрофному типу, перешли в разряд мезотрофных, оз. Ледовое, в свою очередь, можно отнести к эвтрофным, оз. Южное — к мезотрофным. Это говорит о том, что показатель общей численности бактерий очень лабилен и зависит от многих факторов, в том числе климатических. Следовательно, по показателю ОЧБ можно лишь условно определить трофический статус водоема и более информативными в данном случае являются коэффициенты, отражающие соотношение величин двух или более микробиологических показателей, например, соотношение между значениями ОЧБ и численностью гетеротрофов — коэффициент сапробности.

По показателю сапробности все исследуемые озера можно отнести к чистым (табл. 8.4), за исключением оз. Ледовое.

По санитарно-микробиологическим показателям к чистым водоемам можно отнести все озера, за исключением оз. Ледовое, где численность бактерий группы кишечной палочки превышала установленный уровень в 10 раз (рис. 8.2). Подобное значительное превышение было отмечено как в поверхностном, так и в придонном слое воды. Также данный показатель превышен в 2 раза

в поверхностном слое оз. Окуневое, кроме того, в исследовании 2021 г. в воде этого водоема, наряду с ростом численности гетеро- и олиготрофных бактерий, был отмечен рост численности бактерий группы кишечной палочки до 20,7 кл/мл (рис. 8.2), что свидетельствует о возможном загрязнении фекальными сточными водами. Бактерий, относящихся к кишечным патогенам, за два года исследований выявлено не было.

Таблица 8.4

Характеристика озер г. Мурманска по коэффициенту сапробности

Озеро	$K_{сапр}$ , %		$K_{сапр}$ , % 2020 г.	$K_{сапр}$ , %	
	2020 г.	2021 г.		2021 г.	
Северное	0,09	0,01	Среднее	0,03	0,003
Ледовое*	0,2	0,38	Южное	0,06	0,02
Окуневое	0,09	0,06	Треугольное	0,05	0,02
Семеновское	0,07	0,02	Портлубол	—	0,03

Примечание. Характеристика воды: оз. Ледовое — грязная, в остальных озерах чистая.

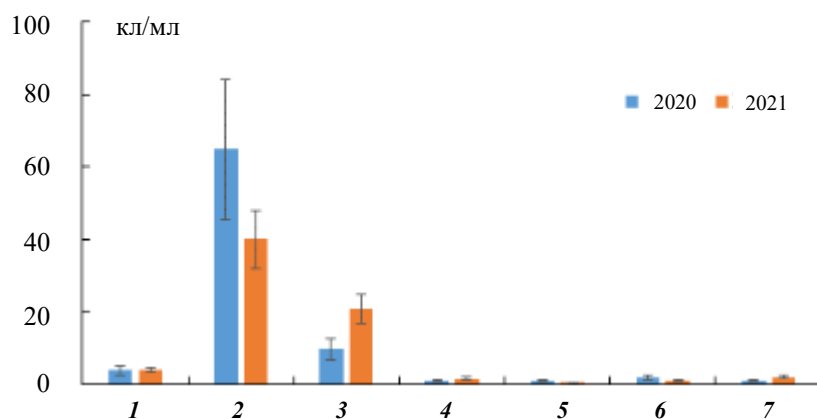


Рис. 8.2. Численность бактерий группы кишечной палочки (кл/мл) в воде озер г. Мурманска: 1 — Северное; 2 — Ледовое; 3 — Окуневое; 4 — Семеновское; 5 — Среднее; 6 — Южное; 7 — Треугольное

Численность обеих трофических групп бактерий в донных отложениях исследуемых озер на три порядка превышала численность бактерий в воде. В 2020 г., как и в образцах воды, самая высокая численность была отмечена для озер Ледовое и Южное — до 1 млн кл/г (рис. 8.3), наименьшая наблюдалась в озерах Семеновское и Среднее — от 41 до 403 тыс. кл/г. В 2021 г. самая высокая численность отмечена для оз. Окуневое (рис. 8.4), наименьшая наблюдалась тоже в озерах Семеновское и Среднее — от 13 до 162 тыс. кл/г. Разница в численности между сапро- и олиготрофной составляющей недостоверна. И только в озерах Среднее и Треугольное можно говорить о преобладании автохтонной составляющей донных отложений, что свойственно более стабильной водной экосистеме.

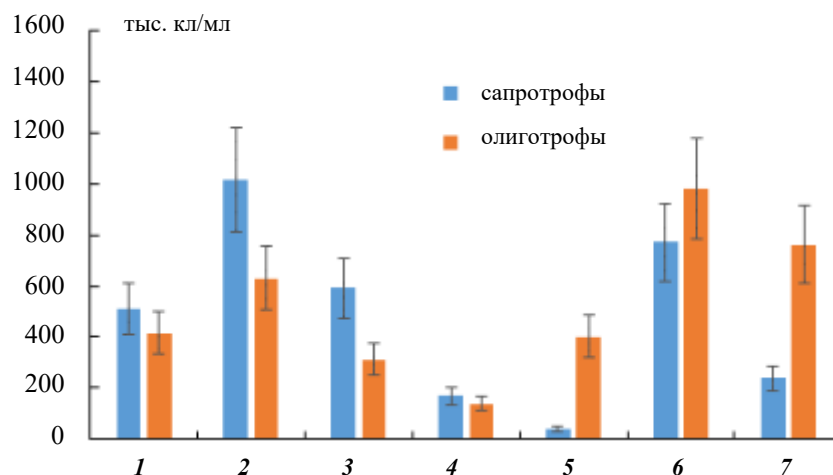


Рис. 8.3. Численность бактерий (тыс. кл/мл) исследуемых трофических групп в донных отложениях озер г. Мурманска (2020 г.): 1 — Северное; 2 — Ледовое; 3 — Окуновое; 4 — Семеновское; 5 — Среднее; 6 — Южное; 7 — Треугольное

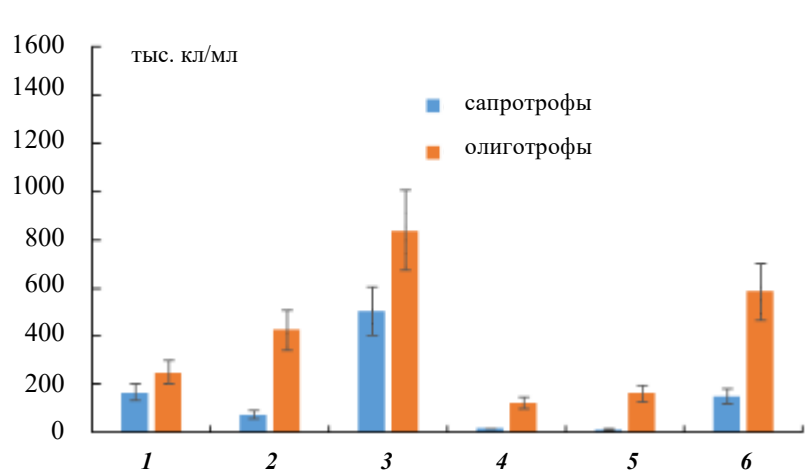


Рис. 8.4. Численность бактерий (тыс. кл/мл) исследуемых трофических групп в донных отложениях озер г. Мурманска (2021 г.): 1 — Северное; 2 — Ледовое; 3 — Окуновое; 4 — Семеновское; 5 — Среднее; 6 — Треугольное

Таким образом, несмотря на достаточно теплое лето и высокую температуру воды летом 2020–2021 гг., численность бактерий в воде озер г. Мурманска невысокая, максимальные значения были отмечены в озерах Ледовое и Южное — в 2020 г., а в озерах Окуновое и Портлубол — в 2021 г. Разница в численности сапро- и олиготрофной составляющей бактериоценоза недостоверна. Не была выявлена и разница между численностью бактерий поверхностного и глубинного слоев воды. Численность бактериоценоза в донных отложениях озер на три порядка выше, чем в водной толще. По показателю общей численности бактерий все озера можно отнести к олиго- или мезотрофному типу. По показателю коэффициента сапробности и санитарно-микробиологическим характеристикам исследуемые озера можно отнести к чистым, за исключением

оз. Ледовое, показатель сапробности которого свидетельствует о довольно высоком уровне микробиологического загрязнения воды, что подтверждается высокой численностью гетеротрофной составляющей и наличием бактерий группы кишечной палочки. Также превышение норматива по численности бактерий кишечной палочки было отмечено в оз. Окуневое, которое используется местным населением в рекреационных целях, в том числе для купания.

**Сообщества фитопланктона.** Большая часть исследований водорослей и цианопрокариот на территории г. Мурманска была посвящена макрофитам акватории Кольского залива Баренцева моря. Данные о пресноводной альгофлоре городских озер практически отсутствуют либо являются фрагментарными. Так, некоторые сведения о гидробионтах мурманских водоемов были получены студентами Мурманского государственного технического университета (Минченков, Гусева, 2017).

За период исследований с 2018 по 2020 гг. всего в планктоне озер г. Мурманска было выявлено 210 таксонов водорослей и цианобактерий рангом ниже рода, из них: диатомовых (Bacillariophyta) — 57; золотистых (Chrysophyceae) — 15; зеленых (Chlorophyta) — 53; динофлагеллят (Dinoflagellata) — 11; харовых (Charophyta) — 24; криптофитовых (Cryptophyta) — 5; эвгленовых (Euglenozoa) — 3; эустигматофитовых (Eustigmatophyceae) — 1; желто-зеленых (Xanthophyceae) — 1; цианобактерий (Cyanobacteria) — 40. Распределение соотношения крупных таксономических категорий и уровень биомассы показаны на рис. 8.5, типичные представители — на рис. 8.6 и 8.7, а список всех выявленных таксонов представлен в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Список видов водорослей и цианопрокариот озер г. Мурманска (2018–2020 гг.).

1 — оз. Среднее, 2 — оз. Южное, 3 — оз. Окуневое, 4 — оз. Северное,  
5 — оз. Семеновское, 6 — оз. Ледовое, 7 — оз. Треугольное, 8 — оз. Рогозеро

Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Cyanobacteria</b>								
<i>Anabaena echinospora</i> Skuja		+	+		+			
<i>Anabaena cylindrica</i> Lemm.					+			
<i>Anathece bachmannii</i> (Kom.-Legn. Cronb.) Komár. et al.					+			
<i>Aphanizomenon gracile</i> Lemm.					+			
<i>Aphanocapsa parasitica</i> (Kütz.) Komár. et Anagn.			+					
<i>Aphanocapsa planctonica</i> (G.M.Smith) Komár. & Anag.	+				+			
<i>Aphanocapsa</i> sp.						+		
<i>Anathece clathrata</i> (West & G.S.West) Komár., Kastovsky & Jezberová						+		
<i>Chroococcus minutus</i> (Kütz.) Näg.				+				
<i>Coelomoron pusillum</i> (Van Goor) Komar.							+	
<i>Dichothrix</i> sp.(?)		+						
<i>Dolichospermum affine</i> (Lemm.) Wack., Hoffm. & Komár.					+		+	



Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Dolichospermum crassum</i> (Lemm.) Wackl., Hoffm. & Komár.					+			
<i>Dolichospermum lemmermannii</i> (Richter) Wacklin, Hoffm. & Komár.	+				+			
<i>Dolichospermum ellipsoides</i> (Boloch. ex Voronich.) Wacklin et al.					+			
<i>Dolichospermum mendotae</i> (W.Trelease) Wacklin, L.Hoffmann & Komár					+			
<i>Dolichospermum solitarium</i> (Klebahn) Wacklin, Hoffm. & Komár.	+				+			
<i>Dolichospermum spp.</i>	+				+		+	
<i>Dolichospermum spiroides</i> (Klebahn) Wacklin, Hoffm. & Komár.					+			
<i>Dolichospermum viguieri</i> (Denis & Frémy) Wacklin, Hoffm. & Komár.		+			+			
<i>Dolichospermum planctonicum</i> (Brunnthaler) Wacklin, Hoffm. & Komár.					+			
<i>Dolichospermum viguieri</i> (Denis & Frémy) Wacklin, Hoffm. & Komár.	+				+			
<i>Leptolyngbya tenuis</i> (Gom.) Anagn. et Komár.	+							
<i>Merismopedia punctata</i> Meyen							+	
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kütz.) Kütz.	+							
<i>Microcystis pulverea</i> (Wood) Forti					+			
<i>Oscillatoria limnetica</i> Lemm.					+	+		
<i>Oscillatoria sp.</i>	+							
<i>Phormidium frigidum</i> Fritsch							+	
<i>Phormidium incrustatum</i> (Näg.) Gom. ex Gom.		+						
<i>Phormidium tenue</i> (Ag. ex Gom.) Anagn. et Komár.					+		+	
<i>Planktolyngbya limnetica</i> (Lemm.) Kom.-Legn. et Cronb.							+	
<i>Planktothrix agardhii</i> (Gom.) Anagn. et Komár.					+			
<i>Pleurocapsa minor</i> Hansg.								
<i>Pseudanabaena catenata</i> Laut.					+			
<i>Pseudanabaena frigida</i> (Fritsch) Anagn.					+			
<i>Pseudanabaena limnetica</i> (Lemm.) Komár.	+				+		+	
<i>Synechococcus sp.</i>								+
<i>Synechocystis aquatilis</i> Sauv.				+				
<i>Woronichinia naegeliana</i> (Ung.) Elenk.					+			

Продолжение таблицы 8.5

Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Bacillariophyta</b>								
<i>Achnantheiopsis fragilarioides</i> (Peters.) Lange-Bert.							+	
<i>Amphora</i> sp.				+				
<i>Asterionella formosa</i> Hass.	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grun.) Simons.		+						
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (O.Müll.) Simons.			+					
<i>Aulacoseira islandica</i> (O.Müll.) Simons.	+							
<i>Aulacoseira italica</i> (Ehrb.) Simons.						+		+
<i>Aulacoseira</i> sp.			+					
<i>Aulacoseira</i> sp.1							+	
<i>Aulacoseira subarctica</i> (O.Müll.) Haworth	+							
<i>Aulacoseira pusilla</i> (F.Meister) A.Tuji & A.Houki	+	+		+				+
<i>Brachysira vitrea</i> (Grun.) R.Ross in Hartley			+					+
<i>Caloneis</i> sp.							+	
<i>Cocconeis</i> sp.				+				
<i>Lindavia bodanica</i> (Eulenstein ex Grun.) T.Nakov, Guillory, Julius, Theriot & Alverson					+			
<i>Cyclotella comensis</i> Grun. in Van Heurck	+							
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz.	+							
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kütz.) Czarnecki		+	+	+				+
<i>Navicula</i> sp.				+				
<i>Cyclotella</i> spp.	+	+	+	+			+	+
<i>Cymbella</i> sp.								+
<i>Cymbopleura amphicephala</i> (Nägeli) Kramm.								+
<i>Diatoma tenuis</i> C.Agardh					+	+		
<i>Diploneis</i> sp.				+				
<i>Encyonopsis minuta</i> Kramm. et E. Reichardt		+					+	+
<i>Epithemia adnata</i> (Kütz.) Bréb.	+							
<i>Fragilaria capucina</i> Desm.					+			+
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt.			+					
<i>Fragilaria famelica</i> (Kütz.) Lange-Bert.			+					
<i>Fragilaria nanana</i> Lange-Bert.				+				
<i>Fragilaria</i> spp.	+	+		+	+	+		+
<i>Fragilaria vaucheriae</i> (Kütz.) B.-Peters.			+	+				
<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehrb.		+						+
<i>Gomphonema consrictum</i> Ehrb.						+		
<i>Gomphonema parvulum</i> (Kütz.) Kütz.		+						

Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Gomphonema sp.</i>				+				
<i>Melosira varians</i> Ag.						+		
<i>Navicula cryptocephala</i> Kütz.	+							
<i>Navicula radiosa</i> Kütz.			+	+				
<i>Nitzschia acicularis</i> W. Smith	+							
<i>Tryblionella angustata</i> W. Smith		+						
<i>Tryblionella circumscuta</i> (Bailey) Ralfs							+	
<i>Nitzschia fruticosa</i> Hust.		+		+				
<i>Nitzschia sp.</i>								
<i>Pinnularia borealis</i> Ehrb.				+				
<i>Pinnularia sp.</i>					+			
<i>Planothidium cf. minutissimum</i> (Krass.) Moral.		+		+				
<i>Staurosira construens</i> Ehreb.	+			+			+	
<i>Staurosirella sp.</i>		+	+	+				
<i>Stephanodiscus minutulus</i> (Kütz.) Cleve et Moller	+		+					
<i>Stephanodiscus sp.</i>	+	+					+	
<i>Surirella brebissonii</i> Kramm. & Lange-Bert.						+		
<i>Surirella elegans</i> Ehrb.				+				
<i>Surirella sp.</i>		+						
<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz.	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth) Kützing	+	+	+	+	+	+	+	
<i>Tabellaria fenestrata var. asterionelloides</i> Grun.	+			+			+	+
<b>Chrysophyceae</b>								
<i>Chromulina sp.</i>					+	+		
<i>Chrysococcus diaphanous</i> Skuja								+
<i>Chrysococcus sp.</i>		+						
<i>Dinobryon bavaricum</i> Imh.				+				
<i>Dinobryon divergens</i> Imh.	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Dinobryon utriculus</i> (Ehrb.) Klebs	+							
<i>Kephyrion inconstans</i> (Gerlinde Schmid) Bourrelly							+	
<i>Mallomonas akrokomos</i> Ruttn.				+				
<i>Mallomonas coronata</i> Boloch.								
<i>Mallomonas punctifera</i> Korsch.			+		+			
<i>Mallomonas sp.</i>				+				
<i>Ochromonas sp.</i>				+				
<i>Synura sp.</i>			+					
<i>Synura sphagnicola</i> Korsh.							+	
<i>Uroglena sp.</i>	+							

Продолжение таблицы 8.5

Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Chlorophyta</b>								
<i>Ankistrodesmus densus</i> Korsch.			+					
<i>Ankistrodesmus falcatus</i> (Corda) Ralfs					+			
<i>Asterococcus</i> sp.		+						
<i>Chlamydomonas</i> sp.					+			
<i>Chlamydomonas anulata</i> Nyg.					+			
<i>Chlorella chlorelloides</i> (Naumann) C.Bock, L.Krienitz & T.Pröschold			+					
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer.					+		+	
<i>Chlorococcum</i> sp.					+			
<i>Chlorolobion braunii</i> (Nägeli) Komár.			+					
<i>Coelastrum</i> sp.				+				
<i>Coenochloris pyrenoidosa</i> Korsch.					+			
<i>Coenococcus planctonicus</i> Korsh.				+				
<i>Crucigenia quadrata</i> Morren	+							
<i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirchn.) W. et G.S.West					+			
<i>Desmodesmus communis</i> (Hegew.) Hegew.				+				
<i>Desmodesmus</i> sp.		+						
<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i> Näg.					+			
<i>Dictyosphaerium subsolitarium</i> Van Goor			+					
<i>Eudorina elegans</i> Ehrb.					+			
<i>Gloeocystis ampla</i> Kütz.	+							
<i>Gloeocystis</i> sp.								+
<i>Gloeotila</i> sp. (?)		+						
<i>Golenkinia brevispina</i> Korsch.			+		+			
<i>Golenkinia radiata</i> Chod.					+			
<i>Golenkiniopsis solitaria</i> (Korsh.) Korsh.							+	
<i>Gonium pectorale</i> Müll.				+				
<i>Gonium sociale</i> (Duj.) Warm. var. sociale			+		+			
<i>Messastrum gracile</i> (Reinsch) T.S.Garcia			+					
<i>Micractinium quadrisetum</i> (Lemm.) G.M.Smith	+							
<i>Microglena</i> sp.			+					
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Kom.-Legn.				+				+
<i>Oocystis borgei</i> Snow				+	+			
<i>Oocystis marssonii</i> Lemm.					+			
<i>Oocystis rhomboidea</i> Fott				+				
<i>Oocystis</i> sp.					+			

Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Pandorina charkowiensis</i> Korsch.					+			
<i>Pandorina morum</i> (O.F.Müll.) Bory de Saint-Vincent in Lamouroux, Bory de Saint-Vincent & Deslongschamps			+		+			
<i>Pediastrum boryanum</i> (Turp.) Menegh.					+			
<i>Pediastrum duplex</i> Meyen		+			+			
<i>Planctococcus sphaerocystiformis</i> Korsch.					+			
<i>Pseudodidymocystis inconspicua</i> (Korsh.) Hindák			+					
<i>Quadrigula chodatii</i> (Tanner-Füllemann) G.M.Smith					+			
<i>Radiococcus nimbatus</i> (De Wild.) Schmidle				+				
<i>Raphidocelis sigmoidea</i> Hind.					+			
<i>Raphidocelis danubiana</i> (Hindák) Marvan, Komár. & Comas					+			
<i>Scenedesmus</i> sp.			+					
<i>Scenedesmus magnus</i> Meyen		+						
<i>Selenastrum bibraianum</i> Reinsch					+			
<i>Selenastrum gracile</i> Reinsch					+			
<i>Sphaerocystis planctonica</i> (Korsch.) Bourr.				+	+			
<i>Sphaerocystis schroeteri</i> Korschik			+					
<i>Tetrachlorella alternans</i> (G.M. Smith) Korsch.				+	+			
<i>Tetraspora gelatinosa</i> (Vauch.) Desv.					+			
<i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i> (Schröd.) Lemm.	+							
<b>Dinoflagellata</b>								
<i>Ceratium hirundinella</i> (O.Müll.) Dujardin	+	+			+			
<i>Parvodinium goslaviense</i> (Wolosz.) Carty	+							
<i>Tyrannodinium edax</i> (A.J.Schilling) Calado						+		
<i>Tyrannodinium berlinense</i> (Lemm.) Calado, Craveiro, Daugbjerg & Moestrup					+	+		
<i>Peridinium</i> sp.	+					+		
<i>Peridinium willei</i> Huitfeldt-Kaas	+	+			+			
<i>Gymnodinium lantzschi</i> Uterm.					+			
<i>Peridinium bipes</i> Stein	+				+			
<i>Peridinium palatinum</i> Lauterborn	+							
<i>Gymnodinium</i> sp.				+				
<i>Peridinium cinctum</i> (O.Müll.) Ehrb.	+							
<b>Charophyta</b>								
<i>Closterium juncidum</i> Ralfs			+					
<i>Cosmarium asphaerosporum</i> Nordst.							+	

Окончание таблицы 8.5

Название вида	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Cosmarium subprotumidum</i> Nordstedt		+				+		
<i>Cosmarium tetraophthalmum</i> (Kütz.) Bréb.				+				
<i>Cosmarium trachypleurum</i> Lund.		+						
<i>Cosmarium botrytis</i> Menegh. ex Ralfs	+				+			
<i>Cosmarium humile</i> Nordstedt ex De Toni				+				
<i>Cosmarium punctulatum</i> Bréb.			+					
<i>Cosmarium</i> sp.					+			
<i>Desmidium cylindricum</i> Grev.	+							
<i>Desmidium</i> sp.		+	+					
<i>Elakatothrix gloeocystiformis</i> Korsch.							+	
<i>Euastrum inerme</i> (Ralfs) Lund.								+
<i>Mougeotia</i> sp. ster.		+						
<i>Pseudostaurastrum lobulatum</i> (Näg.) Bourrelly					+			
<i>Spondylosium planum</i> (Wolle) West & G.West					+			
<i>Staurastrum boreale</i> West & G.West					+			
<i>Staurastrum oblongum</i> Delp.		+						
<i>Staurastrum pentacerum</i> (Wolle) Smith	+							
<i>Staurastrum gracile</i> Ralfs ex Ralfs								+
<i>Stauroidesmus mucronatus</i> var. <i>subtriangularis</i> (West & G.West) Croasdale			+					
<i>Stauroidesmus</i> sp.							+	
<i>Xanthidium</i> sp.			+					
<b>Cryptophyta</b>								
<i>Chroomonas acuta</i> Uterm. (?)					+			
<i>Cryptomonas curvata</i> Ehrb.					+			
<i>Cryptomonas marssonii</i> Skuja						+		
<i>Cryptomonas phaseolus</i> Skuja			+					
<i>Cryptomonas</i> sp.		+						
<b>Euglenozoa</b>								
<i>Trachelomonas</i> sp.							+	
<i>Euglena acus</i> Ehrb.					+			
<i>Euglena</i> sp.					+			
<b>Eustigmatophyceae</b>								
<i>Chlorobotrys regularis</i> (West) Bohlin					+			
<b>Xanthophyceae</b>								
<i>Isthmochloron lobulatum</i> (Näg.) Skuja			+					
<i>Lutherella adhaerens</i> Pasch			+		+			

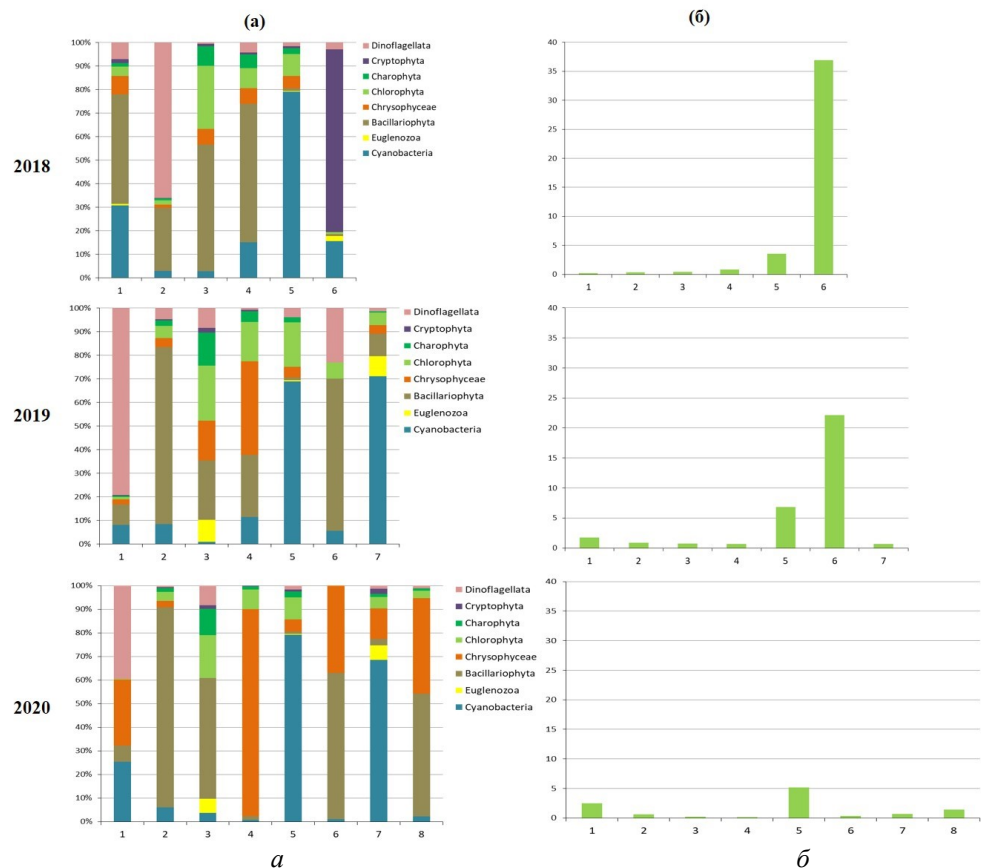


Рис. 8.5. Сообщества фитопланктона озер г. Мурманска в различные годы: *а* — соотношение численности крупных таксономических категорий; *б* — биомасса, г/м<sup>3</sup>; 1 — оз. Среднее; 2 — оз. Южное; 3 — оз. Окуновое; 4 — оз. Северное; 5 — оз. Семеновское; 6 — оз. Ледовое; 7 — оз. Треугольное; 8 — оз. Рогозеро

Структура сообществ фитопланктона исследованных озер отличается присутствием значительной доли цианопрокариот, включая виды, способные вызывать цветение воды и являющиеся потенциально токсичными для водных организмов и человека, включая: *Aphanocapsa planctonica*, *Aphanizomenon gracile*; *Dolichospermum solitarium*; *D. lemmermannii*; *D. affine* (Водоросли..., 2006). В некоторых водоемах в отдельные годы была зарегистрирована высокая доля динофлагеллят и золотистых водорослей. Обращает на себя внимание сравнительно высокое таксономическое богатство зеленых водорослей, сопоставимое с таковым у диатомовых (табл. 8.5). Подобная структура сообществ фитопланктона зачастую характерна для более низких широт, например, реки Самара (Горохова, 2020) и урбанизированных рек Беларуси (Прибыловская и др., 2020). Наибольшее видовое богатство отдела зеленых водорослей (Chlorophyta) выявлено в оз. Семеновское. Это связано не только со значительно большей изученностью этого водного объекта по сравнению с другими озерами г. Мурманска, но и с объективно благоприятными условиями для развития Chlorophyta в водоеме. Наиболее флористически близкими к типичным арктическим альгоценозам были сообщества фитопланктона оз. Рогозеро, где доминировали диатомовые

и золотистые водоросли, характерные для олиготрофных водоемов. Прочие исследованные озера характеризуются в различной степени антропогенно трансформированными альгоценозами.

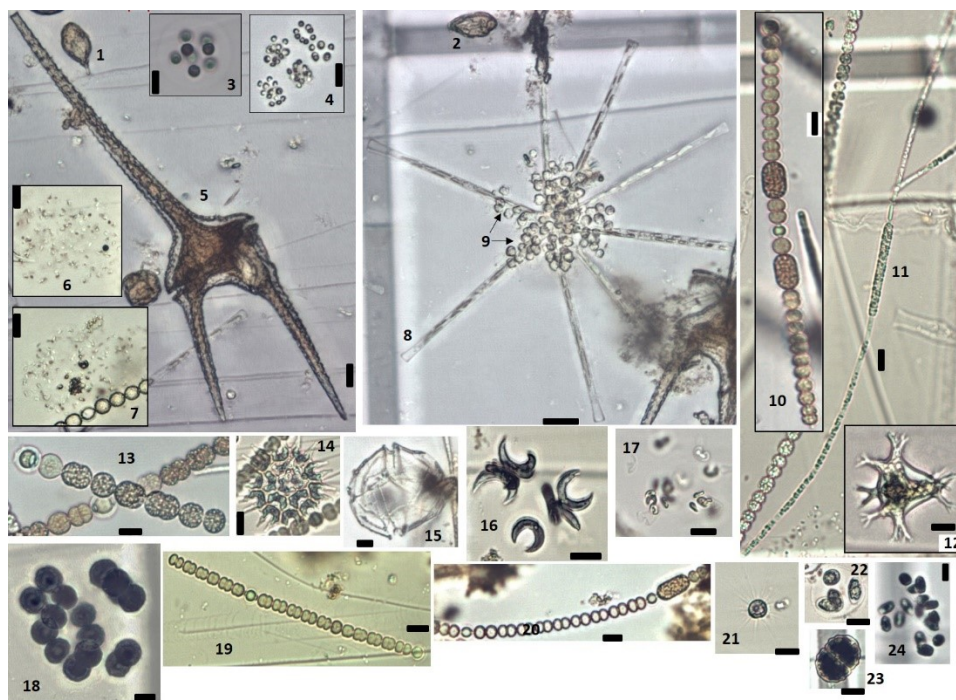


Рис. 8.6. Некоторые типичные представители водорослей и цианопрокариот озер г. Мурманска (2018 г.): 1, 2 — *Mallomonas punctifera* Korsh.; 3, 4 — *Sphaerocystis planctonica* (Korsh.) Bourrelly; 5 — *Ceratium hirundinella* (O. Müll.) Dujardin; 6, 7 — *Anathece clathrata* (West & G.S.West) Komár., Kast.&Jezber.; 8 — колония *Asterionella formosa* Hass. и прикрепленные к ней Choanoflagellata (9); 10 — *Dolichospermum affine* (Lemm.) Wacklin, L.Hoffm. & Komár; 11 — *Aphanizomenon gracile* Lemm; 12 — *Pseudostaurastrum lobulatum* (Nägeli) Bourrelly; 13 — *Dolichospermum solitarium* (Klebahn) Wacklin, L.Hoffm. & Komár; 14 — *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini; 15 — *Peridinium willei* Huitfeldt-Kaas; 16 — *Selenastrum bibraianum* Reinsch; 17 — *Messastrum gracile* (Reinsch) T.S.Garcia; 18 — *Planctococcus sphaerocystiformis* Korsh.; 19 — *Dolichospermum viguieri* (Denis & Frémy) Wacklin, Hoffm. & Komár.; 20 — *Anabaena echinospora* Skuja; 21 — *Golenkinia radiata* Chodat; 22 — *Tetrachlorella alternans* (G.M.Smith) Korsh.; 23 — *Cosmarium subprotumidum* Nordstedt; 24 — *Dictyosphaerium ehrenbergianum* Näg. (линейка — 10 мкм)

Выявлены существенные изменения в структуре сообществ фитопланктона многих исследованных водоемов от года к году. Так, в оз. Ледовое ежегодно наблюдалась полная смена доминирующих видов фитопланктона. В 2018 г. в июле массово развивались криптофитовые водоросли (*Cryptomonas marssonii*), в 2019 г. — диатомовые (*Diatoma tenuis*) и динофлагелляты (*Tyrannodinium edax*), в 2020 г. — диатомовые (*Asterionella formosa*) и золотистые (*Dinobryon divergens*). Кроме того, в 2020 г. в озере наблюдалось резкое падение уровня биомассы фитопланктона — на два порядка по сравнению с предыдущими годами (рис. 8.5, б). Значительные изменения в структуре сообществ наблюдались



и в других водоемах. Так, в оз. Северное с 2018 по 2020 гг. увеличилась доля золотистых водорослей наряду с сокращением диатомовых. Аналогично снизилась доля диатомовых водорослей в сообществах фитопланктона оз. Среднее. Сравнительно стабильные в качественном и количественном отношении сообщества развиваются в озерах Семеновское и Треугольное, где доминируют цианопрокариоты (рис. 8.5).

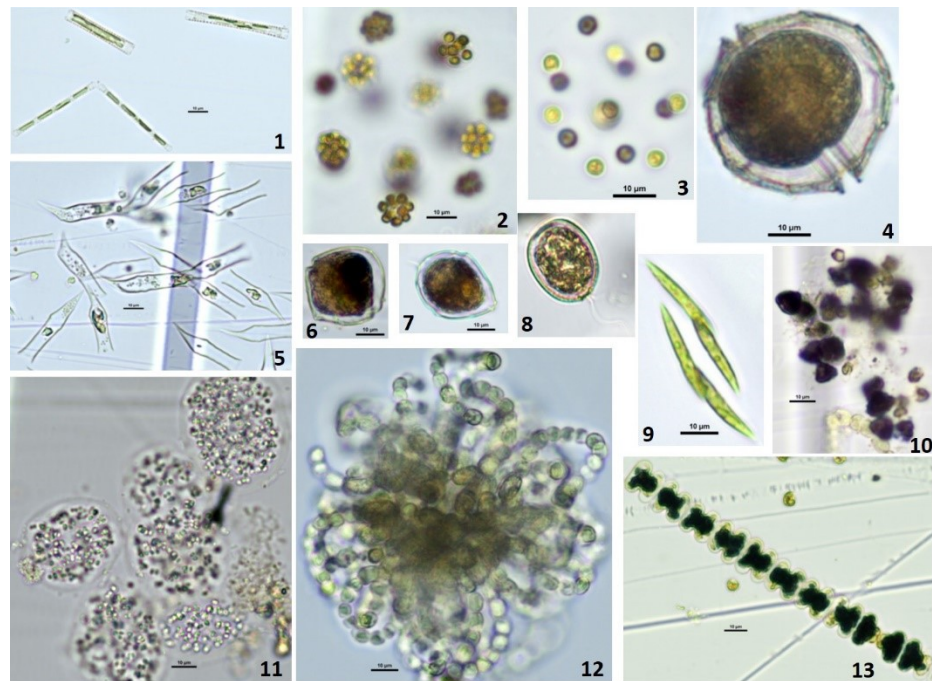


Рис. 8.7. Некоторые типичные представители водорослей и цианопрокариот озер г. Мурманска (2019–2020 гг.): 1 — *Diatomatenuis*; 2, 3 — *Coenococcus planctonicus* Korsh.; 4 — *Peridinium willei* Huitfeldt-Kaas; 5 — *Dinobryon divergens* Imh.; 6 — *Tyrannodinium edax* (A.J.Schilling) Calado; 7 — *Parvodinium goslaviense* (Wolosz.) Carty; 8 — *Trachelomonas* sp.; 9 — *Chlorolobion braunii* (Nägeli) Komár.; 10 — частицы сажи, ассоциированные с фитопланктоном (*Dolichospermum* spp.); 11 — *Aphanocapsa planctonica* (G.M.Smith) Komár. & Anag.; 12 — *Dolichospermum lemmermannii* (Richter) Wack., Hoff. & Komár.; 13 — *Spondylosium planum* (Wolle) West & West

Наблюдаемые изменения во многом оказались обусловлены гидрохимическими факторами, в первую очередь динамикой содержания биогенных элементов. Так, максимальные концентрации соединений фосфора и азота в оз. Ледовое в 2018 г. обусловили массовое развитие фитопланктона и экстремально высокий уровень биомассы (рис. 8.5б, 8.8). В последующие годы наблюдалось резкое снижение фосфатов, общего фосфора и аммиачного азота в воде озера, что привело к уменьшению биомассы фитопланктона. Наряду с этим было отмечено увеличение концентраций токсичных металлов с 2018 по 2020 гг. более чем в 2 раза. В совокупности эти процессы, очевидно, явились причиной ежегодных кардинальных изменений в структуре сообществ и видовом составе планктонных альгоценозов (рис. 8.5а). Важным обстоятельством следует также считать экстремально высокий уровень нитратов в воде оз. Ледового в июле 2020 г., более

чем в 6 раз превышающий концентрации в других исследованных водоемах. Профессором С. С. Бариновой (Barinova) (2018), а также нашими исследованиями (Small Lakes..., 2020) было показано, что нитратный азот полностью используется фотоавтотрофными организмами, если какое-либо иное воздействие, например, токсическое, не препятствует фотосинтетической активности.

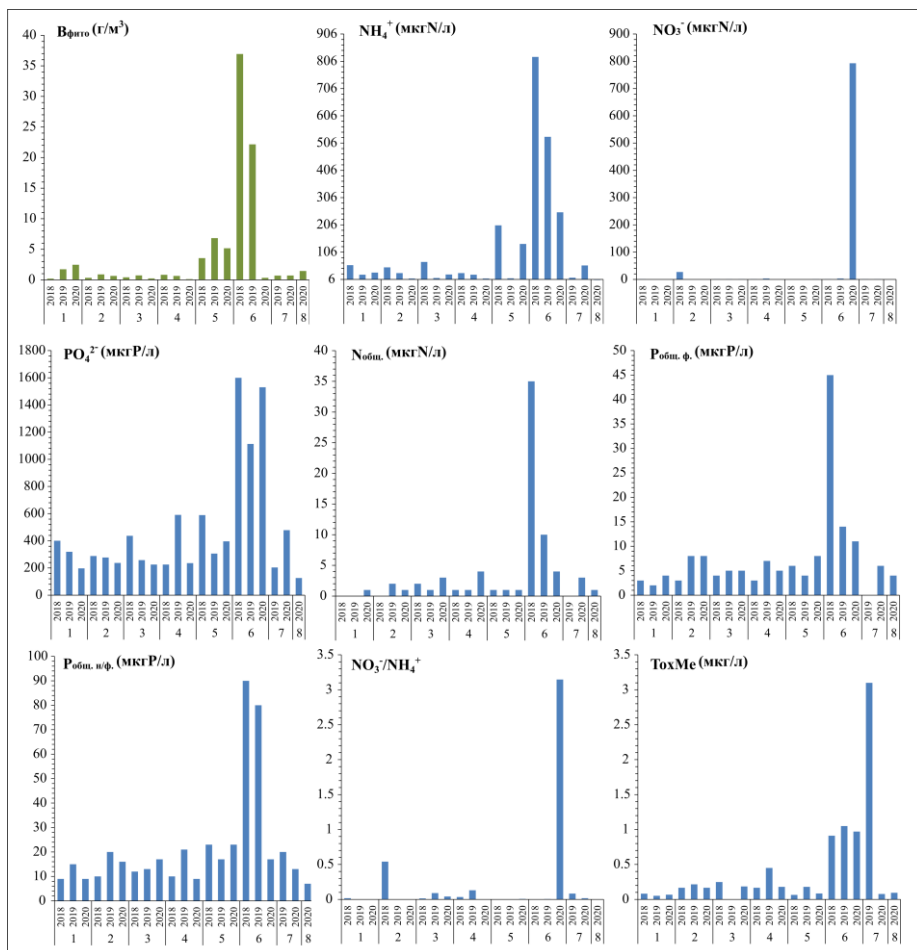


Рис. 8.8. Биомасса фитопланктона исследованных озер в сопоставлении с некоторыми основными гидрохимическими факторами в июле (2018–2020 гг.). ТохМе — сумма концентраций наиболее токсичных металлов (Co, Pb, Cr, Cd)

Резкая смена доминирующих в июле представителей фитопланктона была отмечена для оз. Южное, где в 2018 г. активно развивались динофлагелляты (*Ceratium hirundinella*) — до 65 % в составе фитопланктона, в то время как в последующие годы возросла доля диатомовых — до 84 и 91 % в 2019 и 2020 гг. соответственно. Вероятно, эти изменения были обусловлены высокой токсичностью среды из-за экстремальных концентраций свинца в поверхностном слое воды оз. Южное в июле 2018 г. (рис. 8.8). В этих условиях могли развиваться динофлагелляты, способные к гетеротрофному питанию. Снижение концентраций свинца в последующие годы позволило успешно развиваться диатомовым фотоавтотрофам (рис. 8.5).

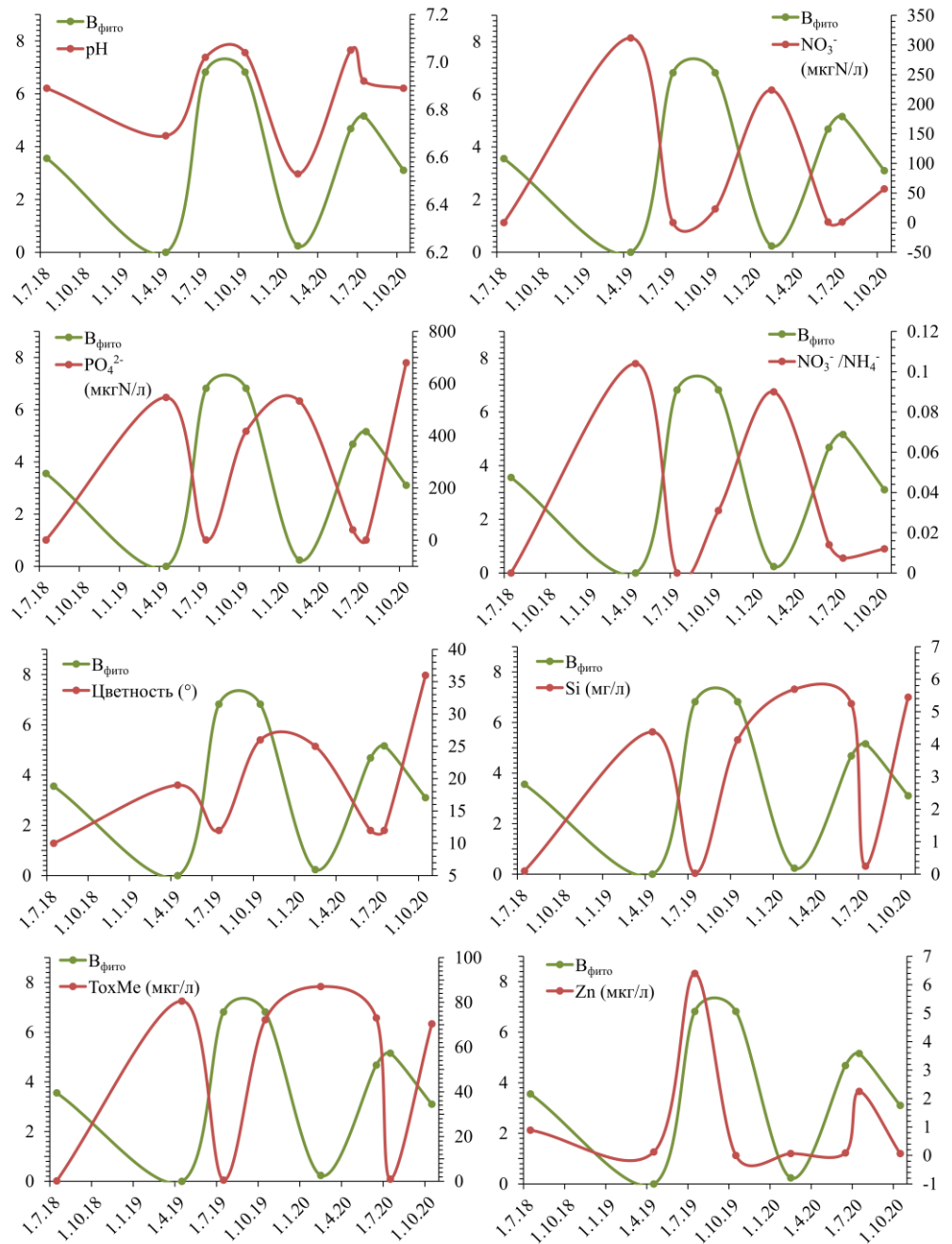


Рис. 8.9. Сезонная динамика биомассы фитопланктона ( $B_{\text{фито}}$ ,  $\text{г/м}^3$ ) в сопоставлении с некоторыми основными гидрохимическими показателями оз. Семеновское (2018–2020 гг.).  
ToxMe — сумма концентраций наиболее токсичных металлов (Co, Pb, Cr, Cd)

Авторами статьи (Biotic..., 2020) было показано, что массовое развитие цианопрокариот обуславливает не только достаточное общее содержание биогенных элементов, но и низкую величину соотношения  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ .

В оз. Семеновское, где значительную долю в составе фитопланктона составляют цианопрокариоты, за весь период наблюдений данное соотношение было минимальным (см. рис. 8.8), при этом в оз. Треугольное, где также господствуют цианопрокариоты, их биомасса значительно ниже, что, возможно, связано с недостатком аммиачного азота, а также со сравнительно более токсичной средой.

При анализе изменений в структуре и видовом составе летнего фитопланктона малых арктических озер необходимо учитывать комплекс метеорологических факторов, изменения которых могут в значительной степени модулировать качественные и количественные показатели альгоценозов. Особенно это актуально для водоемов с низким уровнем водообмена и малой буферной емкостью. Следует принять во внимание, что отбор проб фитопланктона в период с 2018 по 2020 гг. на всех озерах осуществлялся во второй половине июля, когда на территории г. Мурманска устанавливалась жаркая погода. Благодаря этому обстоятельству можно оценить полученные результаты как объективно сопоставимые.

Сезонные наблюдения за фитопланктоном оз. Семеновское позволили выделить ряд ключевых гидрохимических факторов. Было показано, что биомасса фитопланктона в значительной степени определяет величину pH (рис. 8.9, 8.10). В периоды максимального развития фитопланктона наблюдается снижение содержания нитратов, фосфатов и кремния в поверхностных слоях воды. Также было показано, что определенную значимость, стимулирующее развитие водорослей и цианопрокариот имеет содержание цинка, который является необходимым элементом для роста и развития растений (рис. 8.9). В периоды с высокими значениями биомассы фитопланктона наблюдалось некоторое снижение цветности, максимумы биомассы в основном приходились на минимумы содержания токсичных металлов в фотическом слое (рис. 8.9).

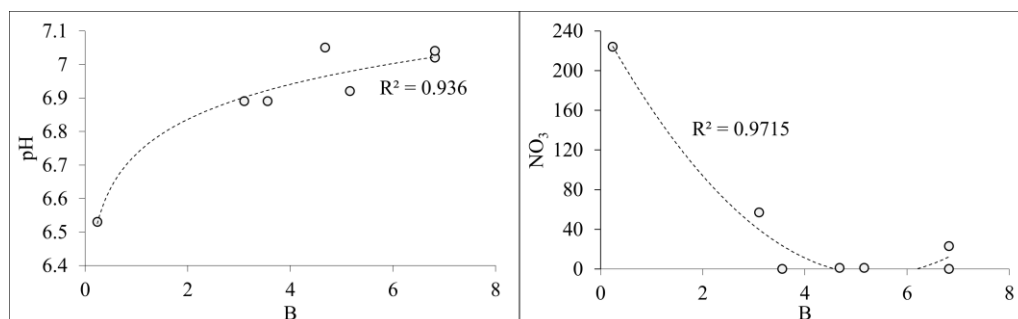


Рис. 8.10. Зависимость биомассы фитопланктона ( $B$ , г/м<sup>3</sup>) от величины pH и содержания нитратов ( $\text{NO}_3^-$ , мкгN/л) в оз. Семеновское (2018–2020 гг.).

Трехлетние наблюдения за динамикой показателей фитопланктона позволяют заключить, что малые водоемы, подверженные многофакторной антропогенной нагрузке, отличаются наиболее резкими изменениями структурно-функциональных показателей сообществ фитопланктона от года к году. Это выражается в смене доминантных видов и резких колебаниях уровня биомассы и свидетельствует о крайне нестабильных условиях обитания гидробионтов.

**Содержание хлорофилла «а» в планктоне.** Содержание хлорофилла «а» (Chla) в планктоне является одним из важнейших критериев при оценке трофического статуса, служит показателем физиологического состояния водорослей и позволяет оценить их продукционный потенциал. Количественные показатели Chla дают возможность определить состояние первого трофического уровня водных экосистем и степень трансформации водоема под влиянием антропогенных факторов. Исследования концентрации Chla в арктических регионах зачастую являются единственным источником достоверной информации о развитии и функционировании водорослевых сообществ в условиях непродолжительного периода вегетации. Информация о содержании Chla для городских водоемов региона в настоящее время не является исчерпывающей (Современные..., 2009; Денисов, 2019), а для озер г. Мурманска она практически отсутствует, в то время как учет этого показателя необходим для адекватной оценки качества вод при реализации программ комплексного экологического мониторинга городской среды.

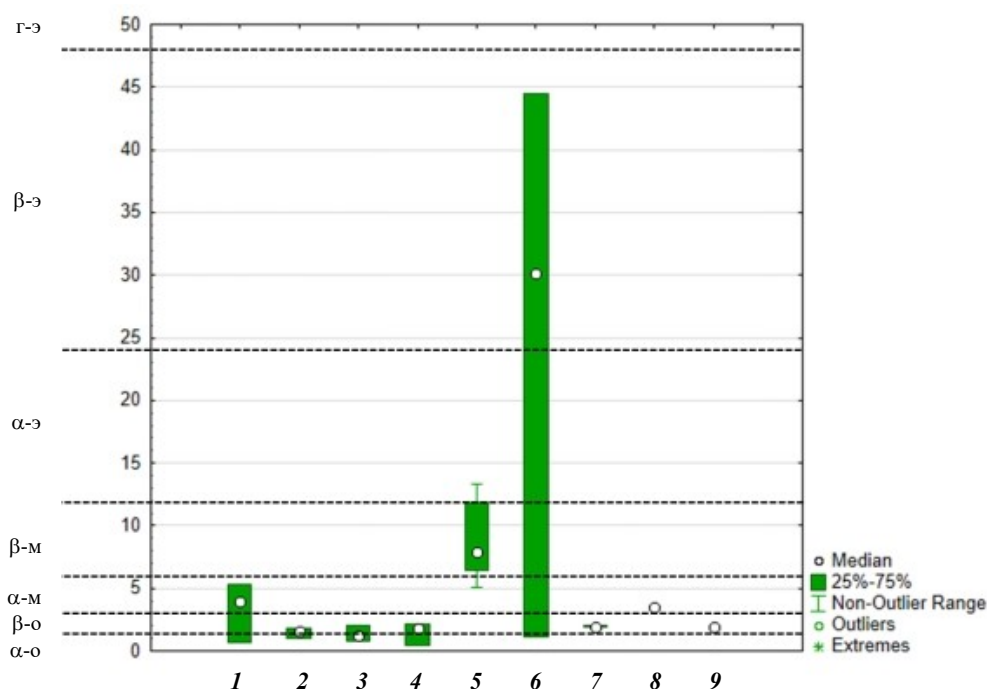


Рис. 8.11. Содержание хлорофилла «а» в июльском планктоне и трофический статус исследованных озер (2018–2020 гг.): 1 — Среднее, 2 — Южное, 3 — Окуновое, 4 — Северное, 5 — Семеновское, 6 — Ледовое, 7 — Треугольное, 8 — Рогозеро, 9 — Большое; α-о — α-олиготрофный, β-о — β-олиготрофный, α-м — α-мезотрофный, β-м — β-мезотрофный, α-э — α-эвтрофный, β-э — β-эвтрофный, γ-э — гиперэвтрофный

Содержание Chla в планктоне исследованных озер существенно различается. Так, в озерах Среднее, Южное, Окуновое, Северное, Треугольное и Большое уровень Chla не превышал  $3,0 \text{ мг/м}^3$ , их воды соответствуют олиготрофному трофическому статусу (рис. 8.11). Озеро Среднее характеризуется средним содержанием Chla — около  $4,0 \text{ мг/м}^3$ , что соответствует  $\alpha$ -мезотрофному статусу; некоторые признаки мезотрофии выявлены для оз. Рогозеро, но количества наблюдений на этом водном объекте недостаточно, чтобы делать объективные выводы. Самые высокие средние концентрации Chla оказались характерны для озер Семеновское и Ледовое —  $7,4$  и  $30,3 \text{ мг/м}^3$ , что позволяет отнести их воды к  $\beta$ -мезотрофному и  $\beta$ -эвтрофному типу соответственно (рис. 8.11). Фоновые значения среднего содержания Chla для озер Кольского полуострова —  $0,2\text{--}0,3 \text{ мг/м}^3$  (Никулина, 1975). Во всех исследованных озерах этот показатель оказался на порядок выше, что характерно для водоемов урбанизированных территорий Мурманской области (Денисов, 2019; Черепанов и др., 2019).

В 2020 г. выполнены детальные наблюдения за сезонными изменениями содержания Chla в планктоне оз. Семеновское (рис. 8.12). Установлено, что в период открытой воды показатель варьирует в диапазоне от  $4,42$  до  $15,73$  и составляет в среднем за сезон  $8,94 \text{ мг/м}^3$  (медиана), что соответствует  $\beta$ -мезотрофному статусу вод (Китаев, 2007). Максимальная фотосинтетическая активность фитопланктона в 2020 г. наблюдалась в первой половине августа. Изменения Chla характеризуются двумя выраженными максимумами, которые приходятся на конец июня и начало августа, к октябрю интенсивность фотосинтеза планктона снижается. Подобный сценарий динамики Chla свойственен мезотрофным водоемам с признаками усиления эвтрофикации (Трифорова, 1990).

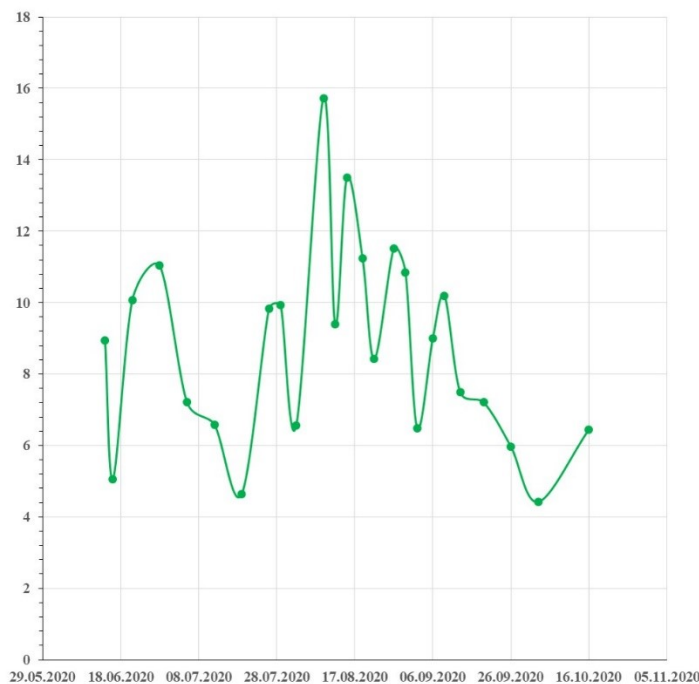


Рис. 8.12. Динамика концентрации хлорофилла «a» ( $\text{мг/м}^3$ ) в планктоне оз. Семеновское в безледный период (2020 г.)

**Зоопланктон.** В результате исследований водных объектов было выявлено 34 таксона видового ранга (табл. 8.6), из которых коловраток (Rotatoria) — 16, кладоцер (Cladocera) — 10, копепод (Copepoda) — 8. Наиболее встречаемыми видами (рис. 8.13) были *Asplanchna priodonta*, *Brachionus calyciflorus*, *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*, *Synchaeta pectinata*, *Bosmina obtusirostris*, *Daphnia cristata*, *D. longispina*, *D. longiremis*, *Holopedium gibberum*, *Mesocyclops leuckarti*, *M. oithonoides*. Также при проведении камеральной обработки были обнаружены представители «грубых» фильтраторов каланоиды *Eudiaptomus gracilis* и *E. graciloides*.

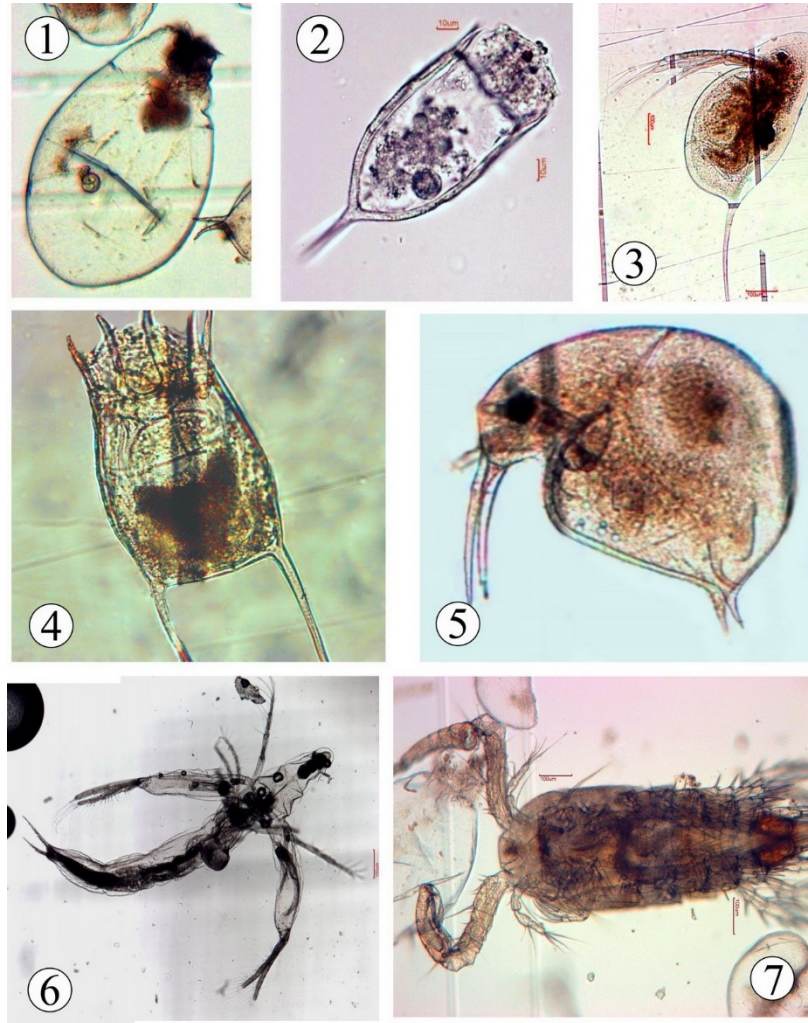


Рис. 8.13. Некоторые представители зоопланктонного сообщества водоемов г. Мурманска: 1 — *Asplanchna priodonta*; 2 — *Keratella cochlearis*; 3 — *Daphnia longispina*; 4 — *Keratella quadrata*; 5 — *Bosmina obtusirostris*; 6 — *Leptodora kindtii*; 7 — *Cyclops scutifer*

Таблица 8.6

Таксономический состав зоопланктонного сообщества исследованных водных объектов (2018–2020 гг.). 1 — оз. б/н (Северное), 2 — Семеновское, 3 — Среднее, 4 — Окуновое, 5 — Ледовое, 6 — оз. б/н (Южное), 7 — Треугольное, 8 — Рогозеро

Таксон	Водоёмы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Rotatoria — Колувратки</b>								
<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse		+	+	+	+		+	
<i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof)			+				+	
<i>Brachionus calyciflorus</i> Pallas			+	+		+	+	+
<i>Brachionus</i> sp.		+				+		
<i>Euchlanis dilatata</i> Ehrenberg			+					
<i>Filinia terminalis</i> (Plate)		+						
<i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg)					+			
<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott)		+	+	+		+	+	+
<i>Keratella cochlearis</i> Gosse		+	+	+	+	+	+	+
<i>K. quadrata</i> (Müller)		+				+	+	
<i>Lecane</i> sp.	+							
<i>Notholca caudata</i> Carlin					+			
<i>Polyarthra</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Synchaeta pectinata</i> Ehrenberg	+	+	+			+	+	
<i>Synchaeta</i> sp.		+						
<i>Trichocerca</i> sp.		+						
Всего в группе	3	10	8	5	5	7	8	4



Таксон	Водоемы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Crustacea — Ракообразные</b>								
<b>Надотряд Cladocera — Ветвистоусые</b>								
<i>Alona</i> sp.		+	+					
<i>B. Obtusirostris</i> Sars		+	+	+	+	+	+	+
<i>Ceriodaphnia affinis</i> Lilljeborg				+				
<i>Chydorus ovalis</i> Kurz		+						
<i>Daphnia cristata</i> G.O.Sars		+	+	+				
<i>D. longiremis</i> G.O.Sars		+			+	+	+	+
<i>D. longispina</i> O.F. Müller	+			+				
<i>Holopedium gibberum</i> Zaddach				+				+
<i>Leptodora kindtii</i> (Focke)		+						
<i>Sidacristallina</i> (O.F.Muller)				+				
Всего в группе	1	6	3	6	1	2	2	3
<b>Надотряд Соперода — Веслоногие</b>								
<i>Acanthocyclops viridis</i>								+
<i>Cyclops scutifer</i> Sars				+			+	+
<i>Cyclops</i> sp.	+	+	+	+	+	+		
<i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars)	+	+				+		+
<i>E. graciloides</i> (Lilljeborg)				+	+			
<i>Heterocope appendiculata</i> Sars				+				
<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus)					+	+	+	
<i>Mesocyclops oithonoides</i> Sars			+	+	+			
<i>Mesocyclops</i> sp.			+				+	
Всего в группе	2	1	3	5	4	3	3	3
<b>Всего</b>	6	17	14	12	10	12	13	10

Общее количество таксонов в исследуемых водных объектах варьировало от 6 до 17 видов. На протяжении всего периода изучения в качестве наиболее бедного в видовом отношении можно выделить оз. Северное, где было выявлено 6 таксонов видового ранга. Наибольшими количественными показателями зоопланктона характеризовался зоопланктон в озерах Семеновское, Среднее и Треугольное.

Представители «грубых» фильтраторов — веслоногих ракообразных группы каланоид *Eudiaptomus gracilis* и *E. graciloides* были обнаружены в 6 из 8 водоемов. Вид *E. gracilis* был обнаружен в озерах Северное, Семеновское, Южное и Рогозеро. Зоопланктер *E. Graciloides*, в свою очередь, был выявлен только в двух из них — Окуновое и Ледовое соответственно. В планктонных пробах оз. Среднего были обнаружены каланоиды в науплиальной стадии. Данные виды являются чувствительными к загрязнению. «Грубые» фильтраторы способны влиять на биофильтрационную способность исследуемых водных объектов.

Анализ проб, отобранных в июле 2019 г., показал, что сообщество зоопланктона исследуемых водных объектов относится преимущественно к коловраточному типу, исключением является оз. Северное. Доля коловраток составляла менее 12 % в величине общей численности. Доминировала на тот период таксономическая группа клadoцер — «тонкие» фильтраторы. Результаты исследования, проведенного в 2020 г., показывают, что в зоопланктонном сообществе произошли изменения. В процентном соотношении основных таксономических групп Rotatoria : Cladocera : Copepoda в величине общей численности сократилось преобладание коловраток в таких водоемах, как Ледовое и Окуновое. В зоопланктоне оз. Южное преобладали группы клadoцер и копепод, которые по величине общей численности составляли 49,2 и 38,6 % соответственно. В ранее не исследованном водоеме Рогозеро преобладала группа коловраток, их процентное соотношение в таксономических группах сообщества 67,7 %, доля ракообразных составляет 32,2 %.

На протяжении всего времени исследований максимальные количественные показатели были выявлены в оз. Семеновское, например, численность зоопланктона в разные периоды варьировала от 1690,3 до 3126,1 тыс. экз/м<sup>3</sup>. Максимальные показатели биомассы, составившие 5,9 и 4,4 г/м<sup>3</sup>, наблюдались летом 2018 и в 2020 гг. что соответствует  $\alpha$ -эвтрофному типу озер.

В сообществе зоопланктона оз. Северное в 2019 и 2020 гг. наблюдались нехарактерные для планктона неглубоких малых водоемов данного региона показатели биомассы, составившие 4,5 и 2,6 г/м<sup>3</sup>, что соответствует типу озер с повышенной эвтрофностью. Нехарактерные показатели зоопланктона были выявлены в оз. Ледовое в 2020 г. Численность организмов составляла 366,1 тыс. экз/м<sup>3</sup>, что на порядок ниже, чем в предыдущие сезоны. Показатели биомассы были высоки и составляли 4,6 г/м<sup>3</sup> —  $\alpha$ -эвтрофный тип. В структуре зоопланктона превалировала *Daphnia longiremis*. Резких скачков количественных показателей зоопланктонного сообщества водоемов Среднее, Южное, Окуновое и Треугольное не наблюдалось.

Несмотря на некоторую трансформацию в сообществе зоопланктона для исследуемых водоемов г. Мурманска характерен обедненный и однородный состав зоопланктонного сообщества с количественным преобладанием коловраток над низшими ракообразными («тонкими» и «грубыми» фильтраторами).

Исследуемые водные объекты характеризуется как мезосапробные и относятся к III классу качества вод — умеренно загрязненные.

Структурно-функциональные показатели зоопланктонного сообщества отражают степень антропогенной нагрузки на водные объекты. Функциональное состояние зоопланктона соответствует высокому трофическому статусу в трех исследуемых озерах: Семеновское, Ледовое и Окуневое. На протяжении всего периода исследований в оз. Семеновское отмечаются anomalно высокие показатели численности и биомассы зоопланктона. Воды исследованных городских водоемов характеризуются «умеренно загрязненными» и имеют средний класс сапробности.

**Зообентос.** Водные экосистемы, расположенные на городских территориях, как правило, подвергаются значительным и разнообразным антропогенным воздействиям, начиная с нарушения гидрологического и теплового режима и заканчивая различными загрязнениями вод. Все эти факторы приводят к существенным изменениям природных характеристик водных объектов, обеднению видового состава, перестройкам структуры сообществ, снижению способности к самоочищению. Исследованию структуры зообентоса водоемов и водотоков урбанизированных территорий уделялось мало внимания, лишь в последние десятилетия стали появляться работы (Каширская и др., 1997, Барышев и др., 2001; Герасимов и др., 2003; Шibaева и др., 2001; Беляков и др., 2015; Беляков, Бажора, 2016), направленные на оценку состояния зообентосных сообществ водных объектов, расположенных на городских территориях.

Целью большинства ранее выполненных в пределах Мурманской области исследований была оценка структурных показателей зообентоса водоемов, находящихся в импактных зонах промышленных предприятий региона: Кольской ГМК (оз. Куэтсьярви, Нюд, Монче-губа), АО «Апатит» (оз. Большой Вудьявр), Ковдорский ГОК (оз. Ковдор) (Яковлев, 2005; Современные..., 2009; Валькова и др., 2012; Комплексные..., 2018; Экологическая..., 2018). Зообентос водоемов, расположенных на урбанизированных территориях, практически не изучался. Имеющиеся в литературе сведения о составе и структуре зообентоса водоемов г. Мурманска фрагментарны, некоторые данные о бентосной фауне озера Семеновское и Ледовое представлены в Ежегодниках состояния экосистем поверхностных вод России (2017, 2019), в 2002–2012 гг. проводились комплексные гидробиологические исследования озера Семеновское, Окуневое и Ледовое (Минченко, Пахомова, 2016).

В составе макрозообентоса за период исследований зарегистрировано 35 систематических групп беспозвоночных разного ранга (табл. 8.7).

Все выявленные группы — типичные обитатели пресных водоемов региона. Число видов в каждом озере значительно варьировало (от 5 до 20), во всех исследованных водоемах встречались только личинки комаров-звонцов и олигохеты. Семейство Chironomidae характеризовалось наибольшим числом видов — 18 видов и форм (51 % от общего количества выявленных таксонов). Для представителей этой группы была характерна и самая высокая встречаемость (60–65 %), что свидетельствует о ее ведущей роли в донных сообществах. Также в пробах были обнаружены водные клещи, двустворчатые и брюхоногие моллюски, пиявки, комары хаоборусы. Среди индикаторных групп зарегистрированы жесткокрылые, поденки и ручейники. Значения индекса Шеннона были невысоки

и варьировали от 0,22 (оз. Ледовое) до 2,67 бит/экз. (оз. Окунеевое), что связано с небольшим числом видов как в отдельных пробах, так и в озерах в целом.

Таблица 8.7

Таксономический состав и некоторые показатели состояния зообентоса исследованных водоемов г. Мурманска (2018–2020 гг.). 1 — Окунеевое, 2 — Семеновское, 3 — Северное, 4 — Южное, 5 — Ледовое, 6 — Среднее

Таксон	Водоем					
	1	2	3	4	5	6
<b>Araneina</b>						
<i>Hydracarina</i> sp.	+	+	+			+
<b>Oligochaeta</b>						
<i>Tubifex tubifex</i> Muller, 1774	+	+	+	+	+	+
<i>Spirosperma ferox</i> Eisen, 1879	+					
<i>Enchytraeidae</i> sp.		+	+			
<b>Gastropoda</b>						
<i>Valvata</i> sp.	+					
<i>Lymnaea</i> sp.	+	+		+	+	
<i>Gyraulus</i> sp.	+	+	+			
<b>Bivalvia</b>						
<i>Euglesa</i> sp.	+	+	+	+		
<b>Hirudinea</b>						
<i>Helobdella stagnalis</i> L., 1758	+	+	+			
<i>Glossiphonia complanata</i> L., 1758						
<b>Diptera</b>						
<i>Chaoborus</i> sp.			+			
<b>Chironomidae</b>						
<b>D i a m e s i n a e</b>						
<i>Diamesa</i> sp.	+		+			
<i>Prodiamesa olivacea</i> Meigen, 1818		+			+	
<i>Monodiamesa bathyphila</i> Kieffer, 1918						+
<b>C h i r o n o m i n a e</b>						
<i>Chironomus</i> sp.	+	+	+			+
<i>Sergentia coracina</i> gr.	+	+				+
<i>Sergentia longiventris</i> gr.						+
<i>Dicrotendipes</i> sp.			+			
<i>Polypedilum</i> sp.			+			
<i>Endochironomus</i> sp.				+		+
<i>Endochironomus tendens</i> Fabricius, 1775			+			+
<i>Tanytarsus</i> sp.	+					

Таксон	Водоем					
	1	2	3	4	5	6
<b>Orthocladinae</b>						
<i>Orthocladus</i> sp.	+		+	+	+	+
<i>Cricotopus</i> sp.		+			+	
<i>Cricotopus silvestris</i> gr.			+			
<i>Psectrocladius</i> sp.	+		+			
<b>Tanypodinae</b>						
<i>Procladius (Holotanypus) choreus</i> Meigen, 1804	+	+	+	+		
<i>Macropelopia</i> sp.	+					
<i>Tanypodinae</i> sp.						+
<b>Coleoptera</b>						
Сем. Dytiscidae		+				
<i>Elmidae</i> sp. l.	+					
<b>Trichoptera</b>						
Сем. Phryganeidae	+					
<i>Molanna</i> sp.	+					
<b>Ephemeroptera</b>						
<i>Ephemerella</i> sp.	+					
<b>Hemiptera</b>						
<i>Corexidae</i>			+			
Общее количество таксонов	20	13	17	6	5	10
Индекс Шеннона, бит/экз.	2,67	1,59	2,80	0,77	0,22	2,70
Индекс Бергера — Паркера	0,35	0,67	0,36	0,88	0,97	0,33
Выравненность по Пиелу	0,74	0,50	0,84	0,33	0,11	0,81

Наиболее неблагоприятными условиями для развития донной фауны характеризовались озера Ледовое и Южное. Литоральные сообщества оз. Ледовое были представлены хирономидами, доля которых достигала 93–99 % от общего количества бентоса, единично встречались брюхоногие моллюски *Lymnaea* sp. В оз. Южное основу литорального зообентоса формировали олигохеты (88 % от общего количества), двусторчатые *Euglesa* sp. и брюхоногие моллюски *Lymnaea* sp. были единичны. В илах центральной зоны обоих водоемов организмы зообентоса отсутствовали, что обусловлено высоким уровнем загрязнения донных отложений тяжелыми металлами и нефтепродуктами, а также дефицитом кислорода, формирующимся в придонных слоях.

В литоральной зоне оз. Семеновское доминировали хирономиды (71 % от общей численности), субдоминантами были брюхоногие моллюски *Lymnaea* sp. и *Gyraulus* sp. (16 %) и олигохеты *Tubifex tubifex* (11 %). Среди хирономид в 2018 и 2019 гг. преобладали мезотрофные личинки *Prodiamesa olivacea*. В 2020 г. возросла доля фитофильных, приуроченных преимущественно к прибрежно-водным крупноосоковым сообществам хирономид *Cricotopus* sp. Основу

биомассы литорального зообентоса формировали брюхоногие моллюски, доля которых достигала 77 % от общей биомассы зообентоса, хирономиды были субдоминантами (16 %). В глубоководной зоне водоема преобладали хирономиды *Chironomus* sp., доля которых составляла 56–94 % общей численности и биомассы донной фауны. Такая структура свидетельствует о процессах антропогенного эвтрофирования и является характерной чертой организации зообентосных сообществ глубоких частей эвтрофных водоемов региона, где формируются относительно однородные пиелофильные биоценозы (Антропогенные..., 2002; Яковлев, 2005).

Также черты антропогенной эвтрофикации наблюдались и для оз. Среднее: в литоральной зоне водоема доминировали хирономиды под/сем. Orthoclaadiinae и олигохеты, суммарная доля которых составляла более 98 % численности и биомассы бентосной фауны. В глубоководной зоне зообентос был представлен мезотрофными хирономидами *Monodiamesa bathyphila* и *Chironomus* sp. и единичными экземплярами олигохет.

Для оз. Северное характерна относительно разнообразная литоральная фауна: отмечено 9 видов хирономид, олигохеты, двустворчатые и брюхоногие моллюски, пиявки, водные клопы, водные клещи. В сообществах доминировали хирономиды (*Tanytarsus* sp., *Orthocladus* sp., *Procladius (Holotanypus) choreus*). Сообщества центральной зоны водоема в 2019 г. были представлены преимущественно личинками комаров рода *Choaborus*, доля которых достигала 95 % численности бентоса. Хаборусы, являясь нектобентосными формами, характеризуются вертикальными суточными перемещениями в толще воды и в дневное время могут образовывать скопления в придонных слоях, что и наблюдалось в период отбора проб в 2019 г. В 2020 г. сообщества центральной зоны водоема были представлены хирономидами *Chironomus* sp. и *Procladius (Holotanypus) choreus*, доля которых достигала 90–95 % от общей численности и биомассы бентоса.

По составу макрозообентоса оз. Окуневое наиболее близко к водоемам незагрязненных районов северотаежной зоны Мурманской области. В литоральной зоне отмечено 15 групп беспозвоночных, только в этом водоеме встречались индикаторные группы: поденки (*Ephemereilla* sp.), ручейники (Phryganeidae, *Molanna* sp.) и жесткокрылые (*Elmidae* sp.). Основу бентосных сообществ по численности формировали хирономиды и брюхоногие моллюски, суммарно доля этих групп составляла 81 % от общего количества бентофауны. По биомассе преобладали брюхоногие моллюски (35 % от общей биомассы) и ручейники (23 %), хирономиды были субдоминантами (16 %). В центральной зоне водоема отмечены только двустворчатые моллюски *Euglesa* sp. и единичные экземпляры хирономид. Обедненный состав зообентоса в зоне профундали, вероятно, обусловлен гидрологическими и морфометрическими особенностями озера: это расположенный среди плотного лесопаркового массива слабопроточный водоем, проявляющий тенденцию к заболачиванию (Минченков, Пахомова, 2016). Значительную часть его акватории занимают заросли гидрофитов, дно водоема покрыто толстым слоем ила-сапропеля, представляющего собой неразложившиеся остатки зоопланктона, зообентосных организмов и органического вещества. Аналогичные особенности состава и структуры зообентоса глубоководных участков наблюдались для ряда водоемов лесной зоны региона со сходными морфометрическими характеристиками и замедленным водообменом (Яковлев, 2005; Валькова, 2020).

Уровень численности и биомассы зообентоса исследованных водоемов варьировал в широком диапазоне, в целом соответствуя значениям, характерным для антропогенно преобразованных водоемов Мурманской области (табл. 8.8).

Таблица 8.8

Количественные показатели зообентоса литоральной и центральной зон исследованных водоемов в 2019–2020 гг.

Озеро	Численность, экз/м <sup>2</sup>		Биомасса, г/м <sup>2</sup>	
	2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.
Окуневое	<u>112</u>	<u>576</u>	<u>16,0</u>	<u>5,7</u>
	588	420	5,9	4,1
Семеновское	<u>160</u>	<u>1088</u>	<u>1,0</u>	<u>20,1</u>
	1014	922	20,2	8,4
Северное	<u>304</u>	<u>480</u>	<u>2,1</u>	<u>2,0</u>
	622	70	3,7	2,4
Среднее	<u>704</u>	<u>560</u>	<u>3,9</u>	<u>2,8</u>
	138	103	1,1	3,1
Южное	<u>784</u>	<u>630</u>	<u>4,0</u>	<u>3,6</u>
	0	0	0	0
Ледовое	<u>4500</u>	<u>22,5</u>	<u>1260</u>	<u>5,2</u>
	0	0	0	0

*Примечание.* В числителе указана зона литорали, в знаменателе — центральная зона.

Анализ экологического состояния водоемов с использованием Кольского биотического индекса (Яковлев, 2005) и олигохетного индекса Гуднайта — Уитлея показала, что уровень загрязнения большинства водоемов по этим показателям можно оценить как «умеренно загрязненные» и «грязные», за исключением оз. Окуневое, воды которого можно отнести к категории «чистые» (табл. 8.9).

Таблица 8.9

Качество вод и некоторые показатели состояния зообентоса исследованных водоемов г. Мурманска

Озеро	КолБИ	Олигохетный индекс Гуднайта — Уитлея, %	Качество вод по ГОСТ 17.1.3.07-82
Окуневое	10	8	Чистые
Семеновское	7	11	Умеренно загрязненные
Северное	7	14	
Среднее	2	23	Грязные (очень грязные)
Южное	2	88	
Ледовое	2	–	

Олигохетный индекс Гуднайта — Уитлея оказался малопоказателен для оценки качества вод городских водоемов, его значения в озерах Семеновское, Среднее и Северное были невелики и соответствовали 1–2-му классу качества «очень чистые», а озеро Южное характеризовалось как «очень грязное», что, по-

видимому, не соответствует действительности. Как показано во многих работах, при загрязнении, токсичном для олигохет, имеющем место и на урбанизированных территориях, индекс Гуднайта не позволяет корректно оценивать состояние водной экосистемы (Яковлев, 1988; Изменения..., 1999; Баканов, 2000; Беляков и др., 2015), следовательно, экологически неблагоприятные водоемы по индексу могут характеризоваться как «чистые».

Таким образом, видовое разнообразие зообентоса исследованных водоемов г. Мурманска было сравнительно невысоко, бентофауна была представлена преимущественно эврибионтными видами, широко распространенными как в условно фоновых, так и загрязненных водных объектах региона. Структура зообентоса, характеризующаяся в большинстве исследованных водоемов низкой выравненностью и выраженным доминированием отдельных систематических групп, свидетельствует о довольно неблагоприятных условиях для обитания гидробионтов. Количественные показатели зообентоса в литорали и глубоководной зоне исследованных водоемов изменяются в широком диапазоне, в целом соответствуя значениям, характерным для антропогенно преобразованных водоемов Мурманской области. В центральной зоне большинства исследованных озер сформированы относительно стабильные пиелофильные биоценозы, в составе которых преобладали эврибионтные виды хирономид. Литораль водоемов более разнородна и характеризуется динамичностью абиотических условий, вследствие чего состав и количественные показатели литоральных сообществ зообентоса подвержены более значительным колебаниям.

Применение биотических индексов в некоторых случаях демонстрирует неоднозначные результаты, поэтому при оценке качества вод необходим комплексный подход. В целом состав, структура и количественные характеристики бентосных сообществ достаточно полно отражают состояние исследованных водоемов и могут быть использованы для мониторинга и оценки экологического состояния водоемов городских территорий.

**Диатомовые комплексы донных отложений оз. Семеновское.** Всего в колонке мощностью 43 см обнаружено 117 видов диатомовых водорослей рангом ниже рода, в 43 родах. Наибольшего таксономического разнообразия достигают представители родов *Eunotia* (22), *Pinnularia* (11), *Aulacoseira* (7). Преобладающими таксонами по относительной численности являются *Frustulia rhomboides* (Ehrenberg) De Toni (до 42 %), *Aulacoseira alpigena* (Grunow) Krammer (до 30 %), *Aulacoseira subarctica* (Otto Müller) E.Y.Haworth (до 30 %), *Cyclotella meneghiniana* Kützing (до 29 %), *Diatoma tenuis* C.Agardh (до 54 %), *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (до 25 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M.Williams & Round (до 15 %) (рис. 8.14).

Выявлены значимые изменения в составе и структуре диатомовых комплексов по направлению от нижних слоев к верхним. В нижних слоях (43–21 см) донных отложений руководящий комплекс представлен ацидофильными видами из родов *Brachysira*, *Eunotia* и *Frustulia*. Отмечается смена доминирующей группы видов. Наблюдается изменение относительной численности *Frustulia rhomboides*: в интервале 43–21 см вид занимал доминирующее положение в диатомовых комплексах, значения достигали 42 %, в интервале донных отложений 20–17 см численность снизилась до 10 %, в последующих слоях относительная численность вида уменьшилась до 2 %.



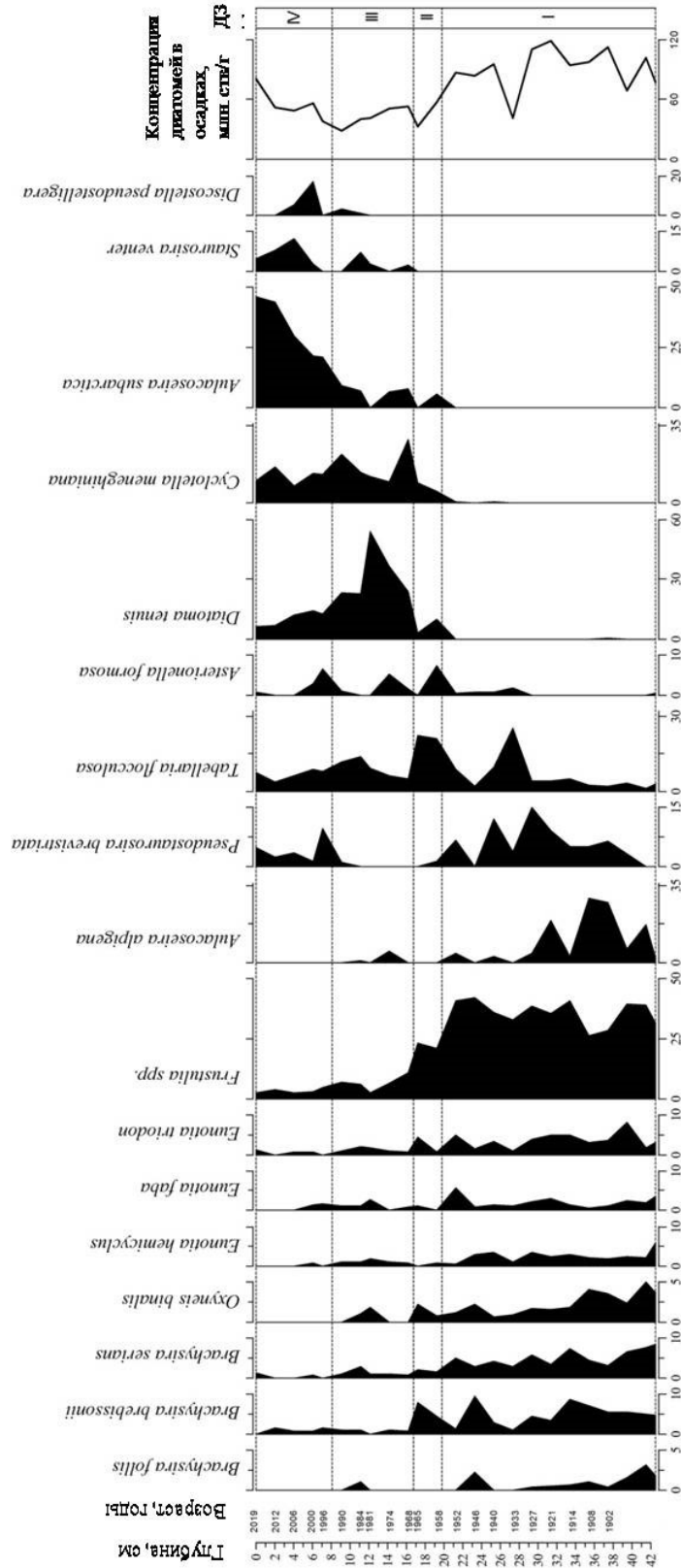


Рис. 8.14. Динамика относительной численности (%) некоторых таксонов диатомей, общей численности  $N_0$  (млн ств/г) в донных отложениях оз. Семеновское и диатомовые зоны

В нижней части колонки донных отложений 43–21 см значительной относительной численности достигал олиготрофный вид *Aulacoseira alpigena* (до 29 %), выше по профилю отложений (30–13 см) он выявлен не во всех слоях и численность его низкая (до 5 %), с глубины 12–11 см — полностью исчез. Выявлено значительное содержание эпифита *Pseudostaurosira brevistriata* (до 15 %), что указывает на существование условий для развития макрофитов.

В верхней части колонки существенно снизилась доля ацидофильных видов родов *Brachisira* и *Eunotia*. Полностью исчезли виды *Eunotia (Semiorbis) hemicyclus* (Ehrenberg) R.M.Patrick и *Oxynois binalis* (Ehrenberg) Round, обитающие в озерах с низким значением pH (5) (Siver, Hamilton, 2011).

С глубины 28–27 см зафиксировано развитие *Asterionella formosa* Hassall — циркумнейтрального вида, достигающего массового развития в мезо- и эвтрофных озерах (Давыдова, 1985). Наибольшие значения (5–7 %) наблюдались в слоях донных отложений 20–19, 15–14, 8–7 см.

С глубины 20–19 см отмечено массовое развитие видов: *Cyclotella meneghiniana* Kützing (до 28 %), *Diatoma tenuis* C.Agardh (до 54 %), а также планктонного вида *Aulacoseira subarctica* (Otto Müller) E.Y.Haworth с мелкими створками. Эти виды обитают в самых разных условиях — от олиготрофных до эвтрофных озер со значением pH < 7, в загрязненных местах (Siver, Hamilton, 2011). Мелкоклеточный планктонный вид *Discostella pseudostelligera* (Hustedt) Houk зафиксирован в интервале 10–4 см донных отложений, на глубине 7–6 см относительная численность достигает 17 %. Обнаружены тератологические изменения штриховки и формы створок диатомовых водорослей (рис. 8.15).

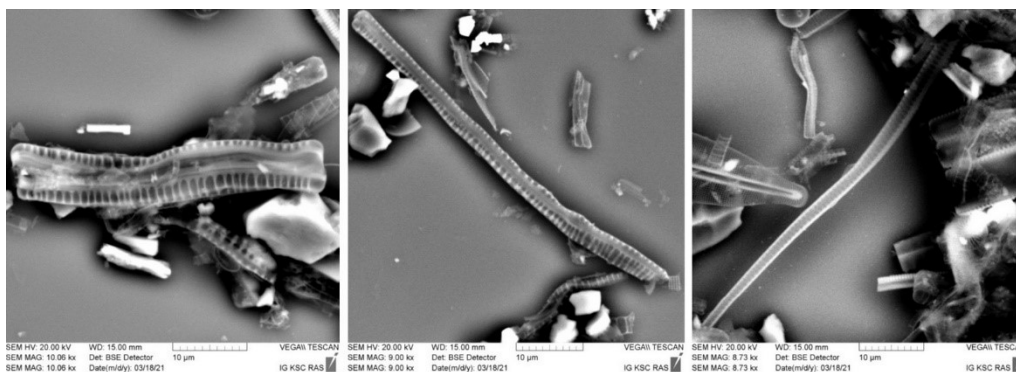


Рис. 8.15. Морфологические нарушения створок панциря диатомовых водорослей оз. Семеновское

Значения показателя общего обилия диатомей ( $N_0$ ) имеют выраженную динамику на протяжении изученной колонки донных отложений и изменяются в пределах 28–119 млн ств/г (рис. 8.16). Резкое снижение отмечается на глубинах 28–27 (42 млн ств/г) и 18–17 см (33 млн ств/г).

Анализ экологических групп диатомей по отношению к местообитанию показал, что в интервале 43–21 см доминируют обрастатели и донные виды (54–82 %), выше по профилю их доля снижается до 12 %. Содержание планктонных форм варьирует вверх по разрезу, достигая 46 % в верхнем слое (рис. 8.16a).

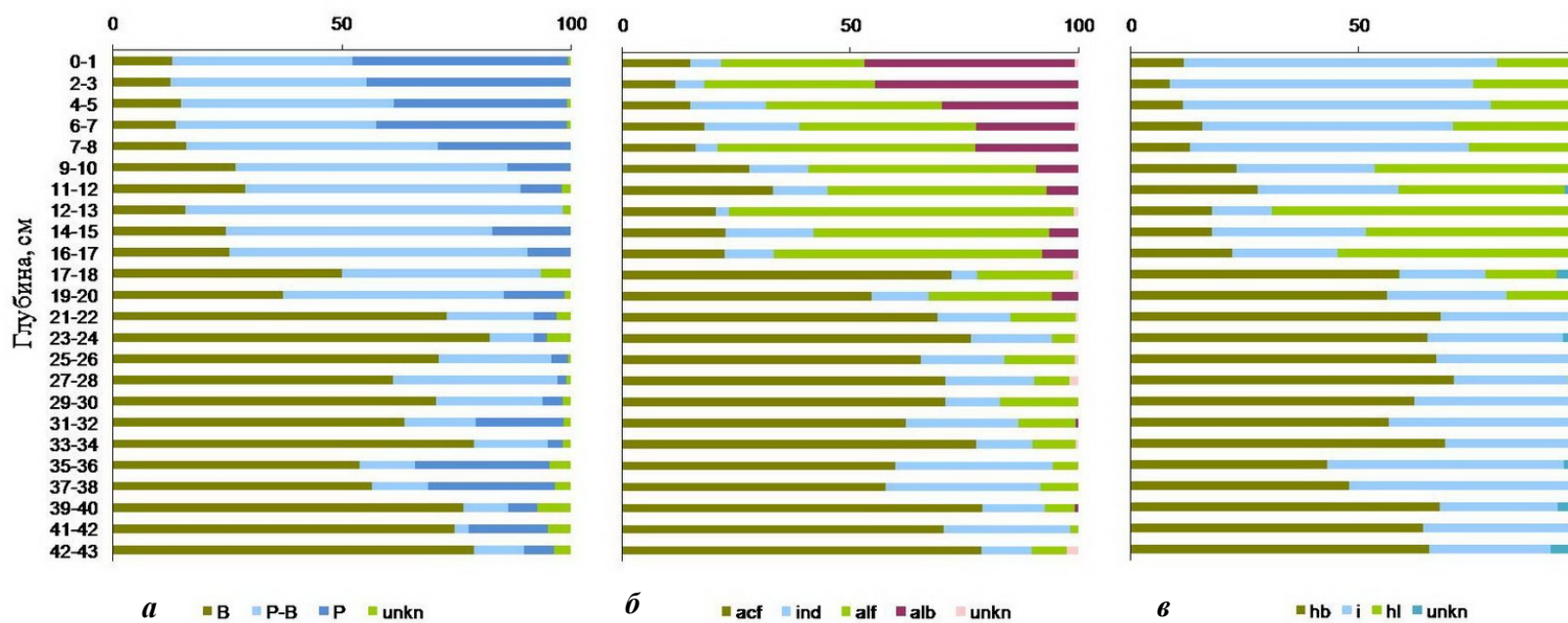


Рис. 8.16. Экологическая характеристика диатомовых комплексов в донных отложениях оз. Семеновское:  
*а* — соотношение видов по отношению к местообитанию (B — бентосные, P-B — планктонно-бентосные, P — планктонные, unkn — неизвестно); *б* — по отношению к pH воды (acf — ацидофилы, ind — индифференты, alf — алкалофилы, alb — алкалобионты, unkn — неизвестно); *в* — по отношению к солености (hb — галофобы, i — индифференты, hl — галофилы, unkn — неизвестно)

Индекс сапробности ( $S$ ) был использован в качестве косвенного показателя изменения уровня трофии озера. В исследованном периоде развития водоема можно выделить два этапа. В интервале 43–21 см значения индекса (0,92–1,23) соответствуют олигосапробной зоне. Выше по колонке индекс сапробности увеличивается и в современном слое достигает значения 2,07, что соответствует  $\beta$ -мезосапробной зоне.

**Этапы изменений среды и диатомовых комплексов.** По результатам кластерного анализа, выполненного на основе соотношения относительной численности диатомей, было выделено четыре диатомовые зоны (ДЗ), соответствующие этапам изменений условий в водоеме (рис. 8.17).

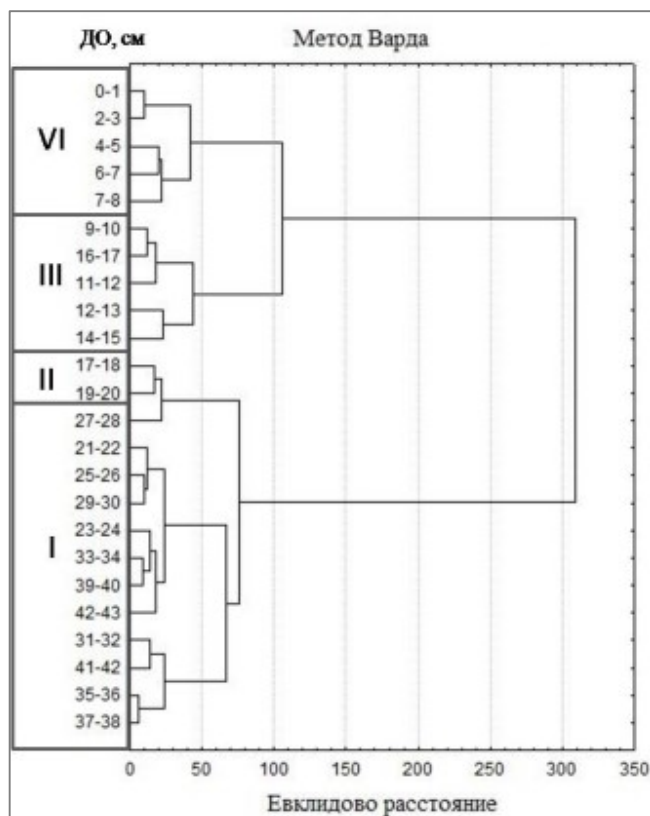


Рис. 8.17. Стратиграфические зоны колонки донных отложений оз. Семеновское, выделенные по результатам кластерного анализа на основе различия и сходства видового состава диатомовых комплексов

*ДЗ I (43–20 см).* Здесь развивалась характерная для северных тундровых водоемов диатомовая флора. Преобладали виды, предпочитающие кислые гуминовые слабоминерализованные воды, с низким или умеренным содержанием питательных веществ. Время формирования донных отложений ДЗ I охватывает и доиндустриальный период, и начало индустриального освоения региона (начало XX в. — 1958 г.) (рис. 8.17).

Изменения состава диатомовых комплексов отмечены с глубины 28–27 см отложений, сформированных в начале 1930-х гг. Наблюдается смена видов,

предпочитающих низкие значения pH (*Brachysira seriens*, *B. follis*, *Eunotia triodon* Ehrenberg), видами, обитающими в более нейтральных водах (*Tabellaria flocculosa*). При этом реконструированное значение pH (6,36) самое низкое на протяжении всей изученной толщи донных отложений (рис. 8.18). Следовательно, на этом этапе развития диатомовой флоры активная реакция воды не является лимитирующим фактором. Развиваются виды (*Asterionella formosa*), характерные для начальных этапов антропогенного эвтрофирования. Показатели индекса сапробности и потерь при прокаливании имеют максимальные значения (1,23 и 60 % соответственно) (см. рис. 8.14), а концентрация створок диатомей — минимальное (41 млн ств/г). Изменения в диатомовом комплексе подтверждаются и результатами кластерного анализа: слой донных отложений 28–27 см выпадает из кластера ДЗ I (43–20 см) и объединяется с кластером ДЗ II (17–20 см). Это позволяет предположить, что условия в эти периоды развития экосистемы озера были схожими.

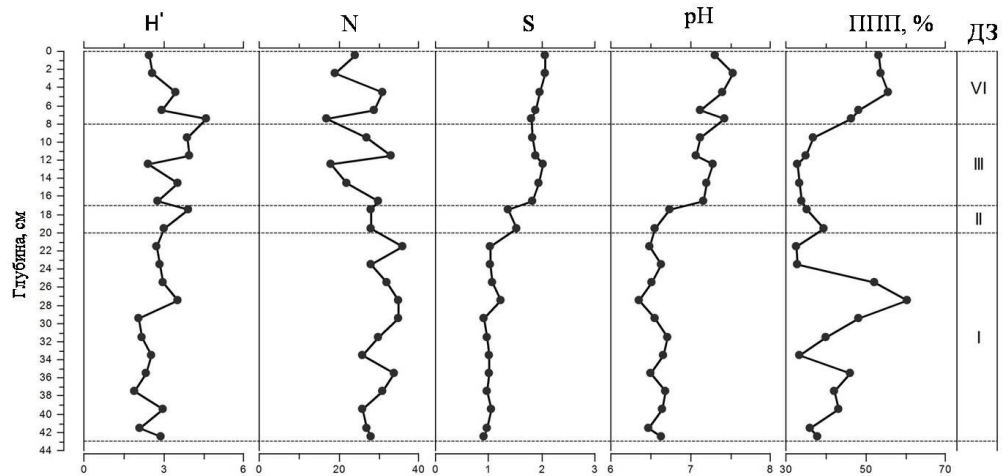


Рис. 8.18. Динамика некоторых показателей диатомовых комплексов ДЗО оз. Семеновское:  $H'$  — индекс видового разнообразия Шеннона — Уивера, бит/экз.;  $N$  — количество видов рангом ниже рода, шт.; pH — реконструированные по диатомовым комплексам значения активной реакции воды;  $S$  — индекс сапробности; ППП — потери при прокаливании

*ДЗ II (20–17 см).* Согласно результатам кластерного анализа, эта зона характеризуется резким отличием от других периодов, что связано с преобразованиями в экосистеме озера. Отложения формировались в период интенсивной застройки города, строительства автодорог, коммуникаций (1958–1965 гг.). Происходящие на протяжении этого периода изменения вызвали снижение обилия диатомей, увеличение трофности, щелочности и минерализации вод в водоеме, что отразилось в развитии видов галофилов и алкалибионтов, не встречающихся в диатомовой флоре на более ранних этапах развития экосистемы озера. Повышение концентраций тяжелых металлов (см. рис. 7.4) в отложениях оз. Семеновское с глубин 20–16 см демонстрирует последствия (в виде загрязнения окружающей среды) процесса урбанизации территорий. Так,

увеличение содержания V и Ni с глубины 17 см демонстрирует влияние мазутных котельных и ТЭЦ города, которые начали работать на мазуте в 1960-х гг.

В ДЗ III (17–8 см) происходила дальнейшая перестройка состава диатомовых комплексов. Здесь продолжает снижаться численность типичных представителей олиготрофных северных водоемов. Поступление биогенных элементов с водосбора приводит к увеличению содержания эвтрофных видов. Для этого этапа развития экосистемы озера характерно абсолютное доминирование *Diatoma tenuis*. Стабильно низкое обилие диатомей и показатели ППП, возможно, связаны с увеличением скорости осадконакопления в связи с поступлением большого количества взвешенного материала (рис. 8.18).

ДЗ IV (8–0 см) отражает период развития экосистемы озера с 1990-х гг. до настоящего времени. Произошла смена доминирующего комплекса с одновременным исчезновением ранее существующих видов (см. рис. 8.14). В этот этап происходит массовое развитие планктонного мезотрофного вида *Aulacoseira subarctica*, который вытеснил планктонно-бентосный эвтрофный вид *Diatoma tenuis*. Численное преобладание планктонных форм над перифитонными и бентосными отражает изменение глубины водоема. Выявлена тенденция развития видов-алкалибионтов по отношению к pH и видов-галофилов по отношению к солености от нижних к верхним слоям отложений. Концентрация створок диатомей увеличивается и достигает значений, отмеченных в ДЗ I. Реконструированные значения pH (7,12–7,54) характеризуют воды в этот период как нейтральные и слабощелочные (см. рис. 8.18).

Полученные на основе диатомового анализа результаты позволяют сделать вывод о развитии водоема за последние 150 лет. Для колонки донных отложений оз. Семеновское выявлены значительные изменения видового состава и структуры диатомовых комплексов, проявляющихся в смене доминирующей группы видов, исчезновении видов, господствующих в нижних слоях колонки. Для водоема характерны процессы защелачивания, увеличение общей минерализации воды, эвтрофирование. Такие изменения в составе диатомового комплекса можно объяснить только влиянием антропогенного фактора на экосистему водоема. Схожие процессы в составе диатомовых комплексах были выявлены в отложениях оз. Большой Вудъявр, испытывающего многофакторное антропогенное воздействие (Denisov, 2007), а также в отложениях городского оз. Ламба (Петрозаводск, Карелия) (Слуковский и др., 2018).

## Глава 9 ИХТИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕР

**Озеро Большое.** В уловах из озера присутствовали представители семейства лососевые *Salmonidae* — кумжа и ряпушка (рис. 9.1). Кумжа была представлена особями длиной 132–250 мм и массой 21–177 г. Особенности распределения кумжи по длине и массе показаны на рис. 9.2.



Рис. 9.1. Представители фауны рыб, отмеченные в уловах из оз. Большое в сентябре и октябре 2020–2021 гг. (фото Зубовой Е. М.)

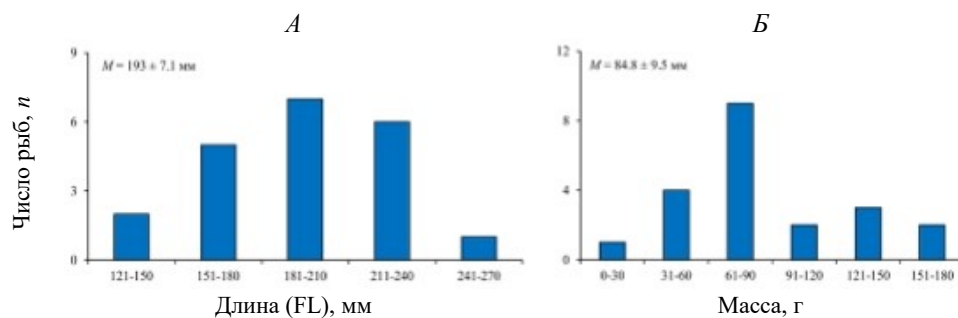


Рис. 9.2. Размерный (FL), мм (А) и весовой, г (Б) составы кумжи из оз. Большое, 2020–2021 гг.

Возрастная структура кумжи из оз. Большое включала особей четырех возрастных групп (от 2+ до 5+ лет), преобладали рыбы в возрасте 3–4+ лет (71 %)

(рис. 9.3А, Б и 9.4А). Линейный и весовой рост кумжи показан на рис. 9.4Б. Несмотря на невысокие линейно-весовые характеристики кумжи в озере, половые продукты двух самок были на IV стадии развития (рис. 9.5), длина половозрелых рыб составила 194 и 231 мм, масса — 76 и 139 г. Абсолютная плодовитость этих самок равнялась соответственно 205 и 278 икринкам.

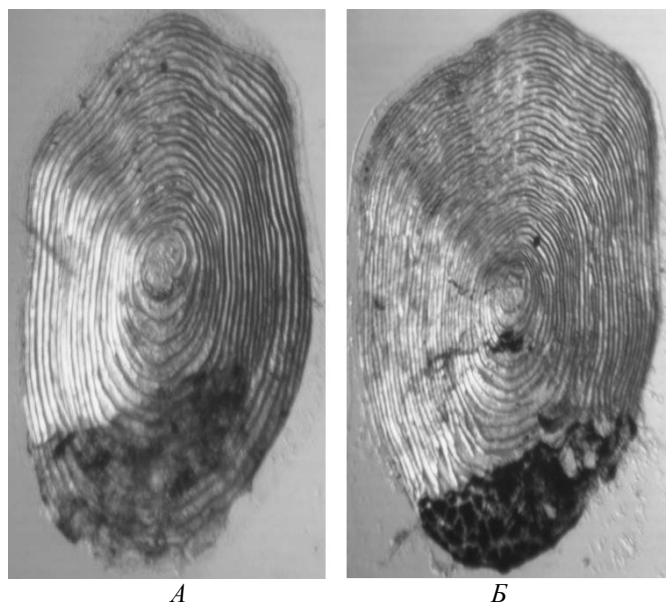


Рис. 9.3. Чешуя кумжи в возрасте 2+ лет (FL = 132 мм) (А) и 5+ лет (FL = 237 мм) (Б) из оз. Большое, 2021 г. (фото Зубовой Е. М.)

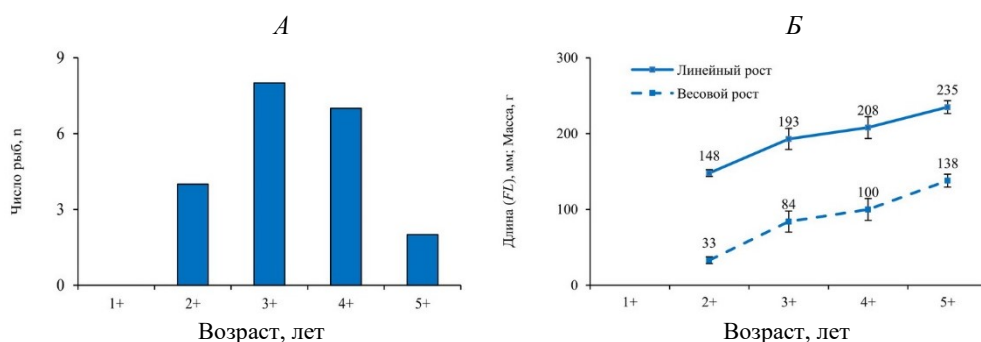


Рис. 9.4. Возрастной состав (А), линейный (FL), мм, и весовой, г, рост (Б) кумжи из оз. Большое, 2020–2021 гг.

Кумжа в оз. Большое главным образом питалась личинками ручейников (рода *Limnephilus*, *Molanna* и род *Phryganea*): индекс относительной значимости (далее IR) для этой группы организмов составил 93,0 %. В желудках двух особей (длиной 174 и 186 мм) была обнаружена трехиглая колношка *Gasterosteus aculeatus* L. (IR = 6,9 %). Также в желудках кумжи присутствовали имаго отрядов хирономиды (семейства *Limoniidae* и *Tipulidae*) и полужесткокрылые (*Cicadellidae*) (рис. 9.6).





Рис. 9.5. Фотография особи преднерестовой кумжи (IV стадия развития гонад), отмеченной в уловах из оз. Большое в сентябре 2020 г. (фото Зубовой Е. М.)

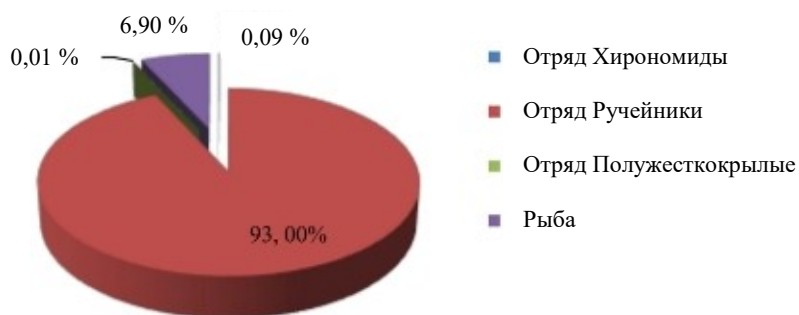


Рис. 9.6. Питание кумжи по индексу относительной значимости IR, %, из оз. Большое, 2020 г.

Четыре выловленные ряпушки (три самца и одна самка) из оз. Большое были преднерестовыми особями (IV стадия развития гонад). Длина ряпушек варьировалась от 118 до 155 мм, масса — от 12 до 33 г. Рыбы были представлены особями в возрасте от 2+ до 4+ лет (рис. 9.7А, Б).

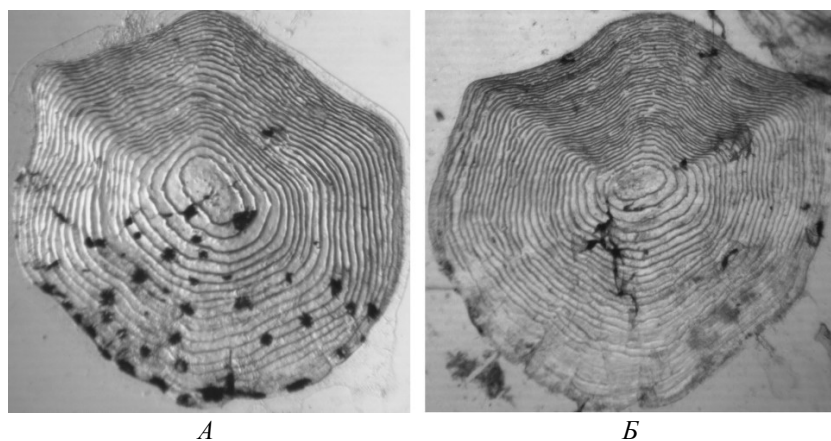


Рис. 9.7. Чешуя ряпушки в возрасте 2+ (FL = 126 мм) (А) и 4+ лет (FL = 155 мм) (Б) из оз. Большое, 2020–2021 гг. (фото Зубовой Е. М.)

**Озеро Семеновское.** Выборки из озера включали два вида рыб — речного окуня (Percidae) и щуку (Esocidae) (рис. 9.8).



Рис. 9.8. Представители фауны рыб, отмеченные в уловах из оз. Семеновское в сентябре 2020 г. (фото Зубовой) Е. М.

Окунь был представлен особями длиной 145–239 мм и массой 42–213 г. Аналогичные показатели щуки изменялись в пределах 325–448 мм и 210–638 г. Распределение окуня и щуки по длине и массе показано на рис. 9.9А, Б.

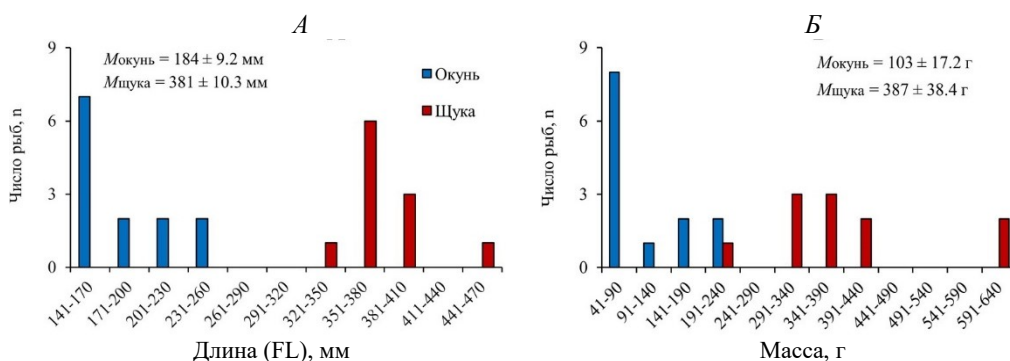


Рис. 9.9. Размерный (FL), мм, (А) и весовой, г, (Б) составы окуня и щуки из оз. Семеновское, 2020 г.

Возрастная структура окуня включала особей в возрасте от 4+ до 5+ лет, щуки — от 3+ до 5+ лет, в выборке доминировали рыбы в возрасте 5+ и 3+ лет соответственно (рис. 9.10А). Линейный и весовой рост окуня и щуки представлен на рис. 9.10Б. Среди особей выловленного окуня (как самцы, так и самки) 46 %

имели стадию развития гонад III–IV. Длина половозрелых окуней составила 158–209 мм, масса — 52–213 г. Среди щук только две особи (длиной 425 и 448 мм, массой 601 и 638 г) имели гонады на III стадии развития. В желудках у питающейся щуки был обнаружен окунь. В питании окуня большую часть «рациона» составлял крупный зоопланктон (*Eurycercus*, *Sida*): значение IR составило 96,5 %. Также окунь питался личинками хирономид (*Chironomus*) и ручейников (*Phryganea*), брюхоногими моллюсками (*Valvata*) и клопами (*Sigara*). У одного окуня длиной 236 мм в желудке была обнаружена рыба (окунь).

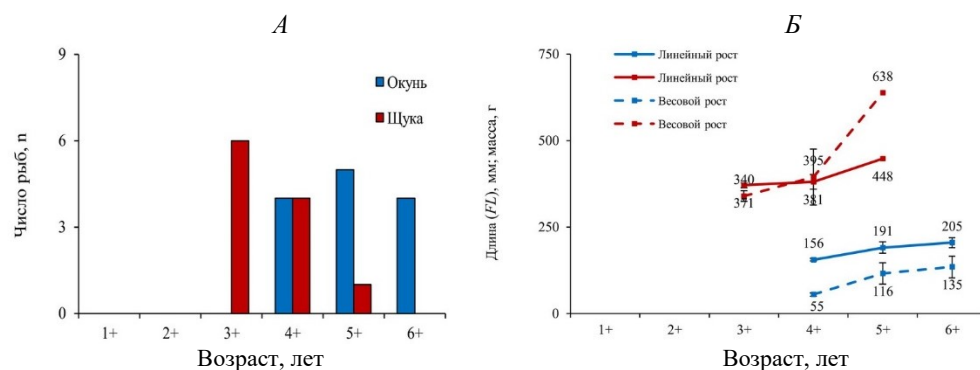


Рис. 9.10. Возрастной состав (А), линейный (FL), мм, и весовой, г, рост (Б) окуня и щуки из оз. Семеновское, 2020 г.

**Озеро Окуневое.** В озере был отмечен только речной окунь (рис. 9.11). Он имел меньший диапазон значений длины и массы, нежели его «коллега» из оз. Семеновское (см. выше): соответственно 130–147 мм и 26–38 г (рис. 9.12).



Рис. 9.11. Представители фауны рыб, отмеченные в уловах из оз. Окуневое в сентябре 2020 г. (фото Зубовой Е. М.)

Окунь в уловах был представлен особями в возрасте от 3+ до 5+ лет, наиболее многочисленными были особи в возрасте 4+ лет (рис. 9.13А, Б и 9.14А).

Линейный и весовой рост окуня из оз. Окунеево был значимо ниже ( $p = 0,001$ ) по сравнению с его «собратом» из оз. Семеновское (рис. 9.10Б, 9.14Б).

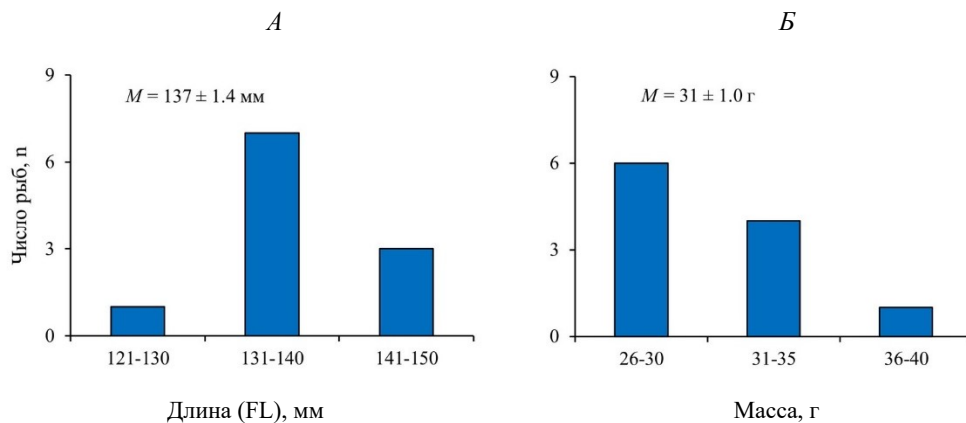


Рис. 9.12. Размерный (FL, мм) (А) и весовой (г) (Б) составы окуня из оз. Окунеево, 2020 г.

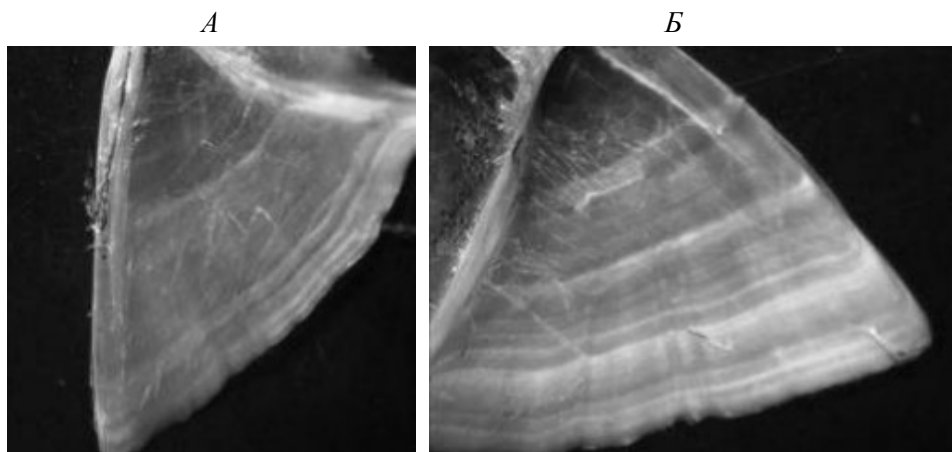


Рис. 9.13. Жаберные крышки окуня в возрасте 3+ (FL = 130 мм) (А) и 5+ лет (FL = 141 мм) (Б) из оз. Окунеево, 2020 г. (фото Зубовой Е. М.)

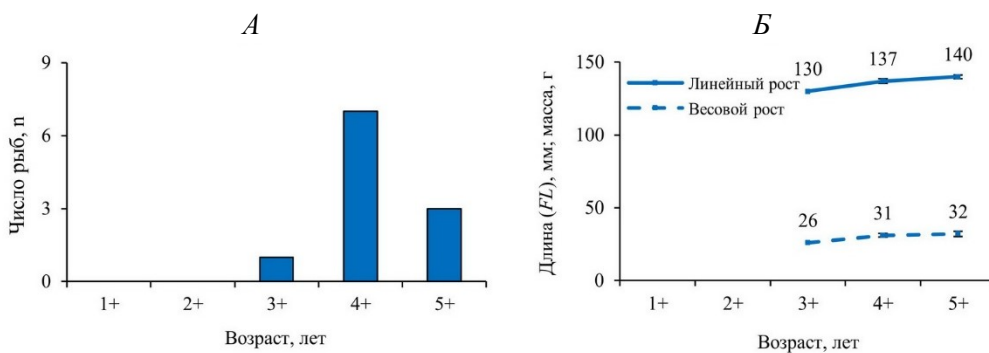


Рис. 9.14. Возрастной состав (А), линейный (FL, мм) и весовой (г) рост (Б) окуня из оз. Окунеево, 2020 г.

Среди особей окуня из оз. Окунеево 91 % имели хорошо развитые половые продукты (III стадия развития гонад). У двух исследованных на питание окуней в желудках были обнаружены личинки хирономид (*Chironomus* и *Procladius*), зоопланктонные организмы (*Eurysercus*) и водяные клопы (*Sigara*).

**Озера Среднее и Северное.** В озерах Среднее и Северное в сетных орудиях лова присутствовал только речной окунь в количестве двух и одного экземпляра соответственно (рис. 9.15А, Б). В оз. Среднее это были две самки в возрасте 5+ лет длиной 173–211 мм и массой 206–254 г, в оз. Северное — самка в возрасте 3+ лет длиной 173 мм и массой 69 г. В первом озере самки имели III стадию развития гонад, во втором — II. В желудках окуней из оз. Среднее были обнаружены остатки рыбы, а из оз. Северное — водяные клопы (*Sigara*).

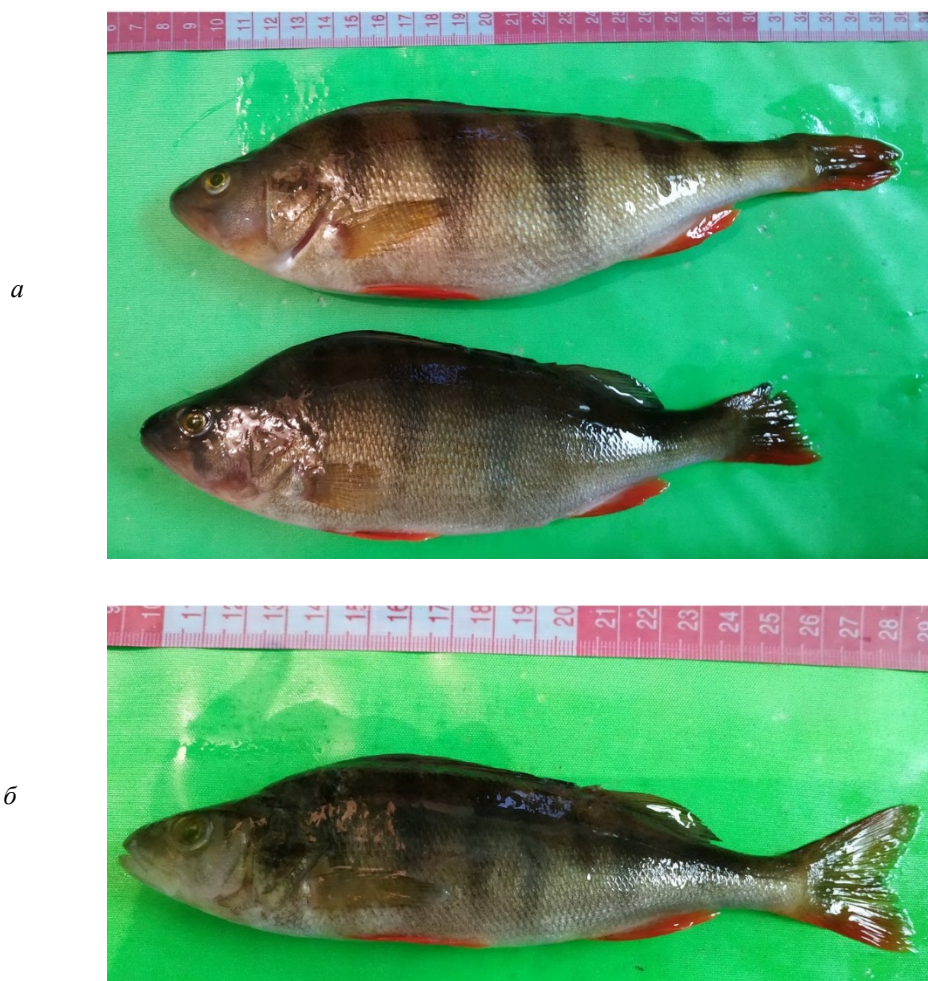


Рис. 9.15. Представители фауны рыб, отмеченные в уловах из озера Среднее (а) и Северное (б) в октябре 2021 г. (фото Зубовой Е. М.)

**Озеро Ледовое.** В сетных орудиях лова рыба отсутствовала.

В прибрежной части всех исследованных озер г. Мурманска обнаруживались скопления трехиглой колюшки *Gasterosteus aculeatus* L. (Gasterosteidae).

Таким образом, предварительные исследования ихтиоценозов озер г. Мурманска, показали их разнотипность. Озеро Большое возможно отнести к сигово-лососевому водоему: ядро ихтиоценоза составляют осенне-зимненерестующие кумжа и сиги, причем кумжа здесь, по всей вероятности, образует жилую озерную (или озерно-речную) форму, созревающую при значимо меньших размерах и возрасте (3–4+ лет), нежели проходная кумжа (Шустер, 1985). Кумжа в оз. Большое является типичным бентофагом и в незначительной мере хищником.

Ядром ихтиоценоза оз. Семеновское являются ранневесеннерестующие щука и речной окунь. В желудках окуня из данного водоема в основном обнаруживался крупный ракообразный зоопланктон. Присутствие в составе пищевого комка окуня организмов бентоса и рыбы говорит об эврифагии окуня оз. Семеновское или о смешанном питании с проявлением каннибализма у более крупных особей. Щука в данном озере является типичным хищником.

Окуневое является окуневым водоемом. Окунь здесь имеют смешанное питание (зоопланктонные и бентосные организмы) и значимо меньшие темпы наблюдаемого линейно-веса роста относительно окуня оз. Семеновское. Высокие темпы роста последнего связаны с большей продуктивностью данного водоема, нежели оз. Окуневое, вызванной его антропогенным загрязнением (Исследования сообществ..., 2019).

Очевидно, в озерах Среднее и Северное обитает только речной окунь.

Отсутствие промысловых видов рыб в оз. Ледовое объясняется сильным загрязнением водоема (The Hydrochemistry..., 2020). Кроме того, его чрезвычайно малые размеры при отсутствии выраженной литорали, участков высшей водной растительности, а также закрытость водоема препятствуют возможности функционирования в нем типичных для арктических систем видов рыб.

На основе вышеизложенного оз. Семеновское можно рассматривать в качестве типичного «городского» водоема в разработке системы комплексного гидробиологического мониторинга, включая рыб. То же самое касается оз. Большое, но с точки зрения наличия сигово-лососевого комплекса.

**Накопление тяжелых металлов в органах рыб озер.** Полученные материалы по тяжелым металлам в организмах рыб городских водоемов г. Мурманска приводятся впервые. Было установлено, что в накоплении рассматриваемых элементов в органах и тканях рыб озер Семеновское и Окуневое нет строго выраженных закономерностей, которые определяют интенсивность нагрузки загрязняющих веществ на водоем. Так, к примеру, содержание меди в мышечной ткани и печени щук оз. Семеновское было выше по сравнению с окунем того же водоема и оз. Окуневое, при этом содержание меди в почках и жабрах было выше у окуня оз. Семеновское. В костной ткани накопление меди происходит более интенсивно у окуня оз. Окуневое. Таким образом, оценку интенсивности нагрузки на рассматриваемые водоемы целесообразно проводить на основе показателей накопления металлов в тех органах, где ее интенсивность была максимальной.

**Медь.** Величина накопления меди в органах и тканях рыб снижалась в такой последовательности: печень > почки > жабры > скелет > мышцы. Наиболее высокое содержание металла в печени и почках у щук оз. Семеновское достигало 22,36 и 7,26 мг/кг сухого веса соответственно, окуня — 10,65 и 17,19 мкг/г; у окуня оз. Окуневое аналогичные показатели составляли 14,63 и 5,41 мг/кг сухого веса (табл. 9.1–9.3).

Таблица 9.1

Содержание металлов в органах окуня оз. Семеновское (мг/кг сух. веса) и величина коэффициента биоаккумуляции  
(на основе накопления в ДО)

Показатель	Ni	Cu	Cr	Sr	Zn	Pb	Mn	Cd	Co	Sb	V	W	Mo
	Мышцы												
Среднее	0,47	0,83	0,84	0,47	17,08	0,04	1,30	0,004	0,01	0,003	2,58	0,01	0,01
min-max	0,09–0,74	0,75–0,94	0,69–1,17	0,29–0,99	15,3–19,5	0,03–0,05	0,88–1,73	0,002–0,01	0,005–0,014	0,002–0,004	0,51–5,48	0,001–0,02	0,002–0,02
Стандартное отклонение	0,21	0,07	0,17	0,25	1,31	0,01	0,32	0,002	0,003	0,001	1,49	0,01	0,005
Kдо	0,002	0,006	0,012	0,001	0,038	0,0004	0,002	0,002	0,0004	0,001	0,003	0,002	0,002
	Печень												
Среднее	0,47	7,60	1,00	0,46	75,06	0,13	10,10	0,43	0,26	0,01	9,81	0,01	0,62
min-max	0,36–0,71	5,88–10,65	0,62–1,57	0,34–0,56	59,7–92,5	0,04–0,37	7,21–14,3	0,29–0,65	0,12–0,43	0,003–0,02	2,22–22,56	0,01–0,04	0,49–0,88
Стандартное отклонение	0,12	1,45	0,36	0,06	9,97	0,12	2,32	0,10	0,10	0,01	6,79	0,01	0,14
Kдо	0,002	0,059	0,015	0,001	0,165	0,002	0,015	0,249	0,011	0,002	0,011	0,004	0,154
	Почки												
Среднее	4,09	7,47	4,85	1,48	144,34	1,08	6,16	0,20	0,22	0,05	68,00	0,03	0,30
min-max	0,86–11,36	3,57–17,19	1,05–9,45	0,56–2,71	97,8–248,7	0,3–3,28	1,87–16,87	0,06–0,67	0,09–0,39	0,004–0,11	7,91–139,49	0,01–0,06	0,08–1,22
Стандартное отклонение	3,22	4,39	3,35	0,76	57,68	0,89	4,85	0,19	0,10	0,04	54,87	0,02	0,34
Kдо	0,015	0,058	0,071	0,004	0,317	0,013	0,009	0,115	0,009	0,014	0,076	0,009	0,073

Окончание таблицы 9.1

Показатель	Ni	Cu	Cr	Sr	Zn	Pb	Mn	Cd	Co	Sb	V	W	Mo
	Жабры												
Среднее	1,36	2,44	1,75	85,13	71,13	1,21	77,87	0,06	0,14	0,02	24,40	0,03	0,05
min-max	1,05–1,9	1,79–2,90	0,75–2,7	73,9–100,5	65,9–78,5	0,34–2,77	20,24–119,42	0,03–0,1	0,12–0,16	0,004–0,04	5,31–48,46	0,01–0,09	0,02–0,08
Стандартное отклонение	0,29	0,38	0,58	6,84	4,56	0,84	32,71	0,02	0,01	0,01	16,09	0,02	0,02
Кдо	0,005	0,019	0,026	0,222	0,156	0,014	0,116	0,036	0,006	0,005	0,027	0,01	0,012
	Скелет												
Среднее	2,32	0,90	1,02	206,86	67,86	0,17	94,24	0,02	0,23	0,01	7,62	0,07	0,08
min-max	2,03–2,82	0,62–1,23	0,43–1,7	169,4–246,7	50,6–93,8	0,07–0,5	25,1–145,96	0,01–0,04	0,2–0,26	0,003–0,02	1,04–21,34	0,02–0,11	0,02–0,11
Стандартное отклонение	0,26	0,25	0,44	27,00	14,83	0,13	39,98	0,01	0,02	0,01	6,06	0,03	0,03
Кдо	0,008	0,007	0,015	0,540	0,149	0,002	0,141	0,010	0,010	0,002	0,009	0,021	0,020



Таблица 9.2

Содержание металлов в органах щуки оз. Семеновское (мг/кг сух. веса) и величина коэффициента биоаккумуляции (на основе накопления в ДО)

Показатель	Ni	Cu	Cr	Sr	Zn	Pb	Mn	Cd	Co	Sb	V	W	Mo
	Мышцы												
Среднее	0,13	1,08	0,79	4,85	15,50	0,04	2,76	0,01	0,01	0,003	3,19	0,01	0,02
min-max	0,07–0,22	0,92–1,30	0,59–1	2,17–6,33	14,24–18,19	0,02–0,08	1,30–4,14	0,002–0,03	0,01–0,02	0,001–0,01	1,04–4,5	0,001–0,02	0,001–0,17
Стандартное отклонение	0,04	0,13	0,13	1,47	1,20	0,02	0,91	0,01	0,004	0,002	1,36	0,01	0,05
K <sub>до</sub>	0,0005	0,008	0,012	0,013	0,034	0,0004	0,004	0,003	0,001	0,001	0,004	0,002	0,006
	Печень												
Среднее	0,39	15,70	0,98	0,35	106,72	0,05	4,62	0,05	0,11	0,00	1,78	0,01	0,69
min-max	0,16–1,2	7,47–22,36	0,48–2,73	0,19–0,77	62,1–147,84	0,03–0,08	2,93–6,24	0,03–0,1	0,7–0,17	0,002–0,01	0,03–5,45	0,002–0,01	0,42–1
Стандартное отклонение	0,30	4,23	0,66	0,17	28,22	0,01	0,98	0,02	0,03	0,00	1,72	0,003	0,19
K <sub>до</sub>	0,001	0,123	0,014	0,001	0,234	0,001	0,007	0,029	0,005	0,001	0,002	0,002	0,170
	Почки												
Среднее	1,61	6,78	1,30	0,84	290,34	0,18	3,96	0,61	1,05	0,03	9,21	0,01	0,33
min-max	1,19–2,06	6,25–7,26	1,05–1,55	0,66–1,04	174,8–342,3	0,12–0,24	3,14–4,58	0,37–1,07	0,65–1,3	0,02–0,05	4,95–18,17	0,004–0,02	0,27–0,38
Стандартное отклонение	0,31	0,32	0,16	0,12	46,89	0,04	0,44	0,21	0,18	0,01	4,59	0,01	0,03
K <sub>до</sub>	0,006	0,053	0,019	0,002	0,638	0,002	0,006	0,354	0,044	0,008	0,010	0,003	0,081
	Жабры												
Среднее	1,62	1,71	0,49	122,66	270,41	0,69	36,62	0,06	0,17	0,01	4,19	0,01	0,01
min-max	1,46–1,81	1,58–2,1	0,25–0,77	107,5–132,1	206,3–380,9	0,12–1,89	30,69–41,69	0,04–0,09	0,16–0,19	0,004–0,01	0,17–0,34	0,01–0,03	0,004–0,03
Стандартное отклонение	0,13	0,16	0,19	8,63	47,73	0,64	3,93	0,02	0,01	0,00	2,39	0,01	0,01
K <sub>до</sub>	0,006	0,013	0,007	0,320	0,594	0,008	0,055	0,035	0,007	0,002	0,005	0,005	0,003
	Скелет												
Среднее	2,47	0,68	0,45	183,65	81,53	0,05	49,19	0,01	0,24	0,00	2,00	0,01	0,01
min-max	2,16–2,72	0,57–1,1	0,23–0,66	161,5–197,9	68,1–114,6	0,04–0,06	39,91–61,17	0,002–0,01	0,21–0,38	0,003–0,01	0,13–4,5	0,003–0,02	0,002–0,04
Стандартное отклонение	0,18	0,15	0,17	10,30	14,20	0,01	6,75	0,003	0,05	0,001	2,01	0,004	0,01
K <sub>до</sub>	0,009	0,005	0,007	0,479	0,179	0,001	0,073	0,004	0,010	0,001	0,002	0,003	0,002

Таблица 9.3

Содержания металлов в органах окуня оз. Окуновое (мг/кг сух. веса) и величина коэффициента биоаккумуляции  
(на основе накопления в ДО)

Показатель	Ni	Cu	Cr	Sr	Zn	Pb	Mn	Cd	Co	Sb	V	W	Mo
	Мышцы												
Среднее	0,15	0,91	1,38	0,43	15,49	0,03	0,79	0,01	0,09	0,01	0,33	0,02	0,01
min-max	0,07–0,25	0,08–0,99	0,98–1,9	0,2–1,83	14,16–16,95	0,01–0,05	0,68–0,85	0,001–0,01	0,003–0,62	0,001–0,05	0,25–0,61	0,002–0,1	0,004–0,03
Стандартное отклонение	0,05	0,05	0,30	0,49	0,91	0,01	0,06	0,004	0,20	0,01	0,11	0,03	0,01
Kдо	0,001	0,01	0,02	0,002	0,06	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,01	0,005
	Печень												
Среднее	0,71	12,35	1,34	0,78	111,10	0,09	11,53	4,06	1,54	0,01	3,75	0,03	1,13
min-max	0,39–1,39	7,7–14,63	0,81–2,09	0,23–2,28	80,3–140,8	0,04–0,15	6,68–18,5	1,9–8,95	1,05–2,23	0,004–0,02	1,59–7,47	0,01–0,05	0,71–1,39
Стандартное отклонение	0,29	2,12	0,38	0,60	21,30	0,04	3,69	2,04	0,40	0,01	2,13	0,01	0,25
Kдо	0,01	0,13	0,02	0,003	0,41	0,00	0,05	2,55	0,05	0,004	0,02	0,01	0,54
	Почки												
Среднее	1,29	3,65	0,28	0,85	85,21	0,28	3,09	0,32	0,33	0,01	2,33	0,07	0,11
min-max	0,78–2,33	2,53–5,41	0,2–0,55	0,41–2,48	70,9–94,7	0,08–1,5	1,19–6,72	0,14–0,67	0,18–0,49	0,002–0,04	0,84–4,57	0,005–0,3	0,06–0,16
Стандартное отклонение	0,53	0,97	0,11	0,63	6,56	0,44	2,15	0,15	0,11	0,01	1,40	0,09	0,03
Kдо	0,01	0,04	0,004	0,003	0,32	0,004	0,01	0,20	0,01	0,005	0,01	0,03	0,05
	Жабры												
Среднее	1,60	1,89	1,63	90,34	72,75	0,29	24,70	0,07	0,25	0,01	2,98	0,02	0,05
min-max	1,12–3,0	1,48–2,56	1,37–2,13	74,9–114,8	65,8–79,2	0,14–0,44	19,43–36,08	0,05–0,11	0,16–0,52	0,002–0,03	1,52–4,78	0,003–0,06	0,03–0,07
Стандартное отклонение	0,55	0,37	0,25	13,90	4,73	0,10	5,79	0,02	0,10	0,01	1,02	0,02	0,01
Kдо	0,01	0,02	0,02	0,34	0,27	0,004	0,10	0,04	0,01	0,003	0,02	0,01	0,02
	Скелет												
Среднее	2,64	1,01	1,22	218,10	81,73	0,25	32,01	0,05	0,21	0,01	3,84	0,02	0,04
min-max	2,18–3,05	0,9–1,18	0,69–1,86	200–259,8	77,6–88,5	0,14–0,33	26,84–39,3	0,02–0,08	0,17–0,26	0,002–0,02	2,13–5,04	0,01–0,03	0,02–0,05
Стандартное отклонение	0,24	0,08	0,32	18,54	3,21	0,07	4,03	0,02	0,03	0,00	0,96	0,01	0,01
Kдо	0,02	0,01	0,02	0,83	0,30	0,003	0,13	0,03	0,01	0,003	0,02	0,01	0,02

Среднее содержание металла в жабрах окуня исследованных озер составляло 1,89–2,44 мкг/г, у щуки — 1,71 мг/кг сухого веса. Наиболее низкие показатели накопления меди у рыб отмечены в костной и мышечной ткани. В скелете и мышцах окуня и щуки содержание меди в среднем варьировало в пределах 0,7–1,1 мкг/г. Уровень накопления меди в органах-мишенях (где накопление металла максимально) окуня и щуки (печень и почки) в целом сопоставим с наиболее интенсивно загрязняемым водоемом региона — оз. Куэтсьярви (Терентьев и др., 2019). Следует отметить, что для печени и почек не выявлено строгой межвидовой и пространственной закономерности аккумуляирования меди. В печени содержание меди было выше у щуки оз. Семеновское. Более высокие концентрации металла в почках отмечены у окуня оз. Семеновское, что обусловлено присутствием отдельных экземпляров с повышенным нежели у остальной выборки содержанием меди (рис. 9.16).

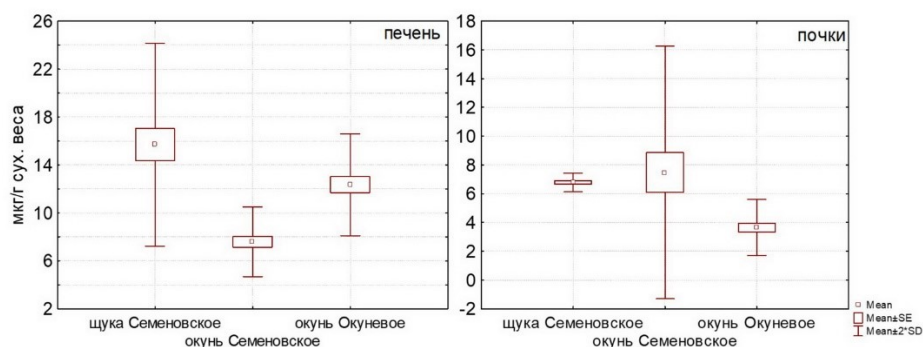


Рис. 9.16. Содержание меди в печени и почках рыб озер Семеновское и Окуновое

**Никель.** Для данного элемента интенсивность накопления снижалась в последовательности: почки > скелет > жабры > печень > мышцы у щуки. У окуня наиболее высокие содержания металла отмечены в костной ткани.

Максимальные показатели накопления никеля были отмечены в почках окуня оз. Семеновское (до 11,36 мкг/г). В скелете рыб средние содержания металла находились на уровне 2,3–2,6 мг/кг сухого веса (см. табл. 9.1–9.3). Также обращает на себя внимание отсутствие закономерности аккумуляирования никеля у окуня двух озер (рис. 9.17).

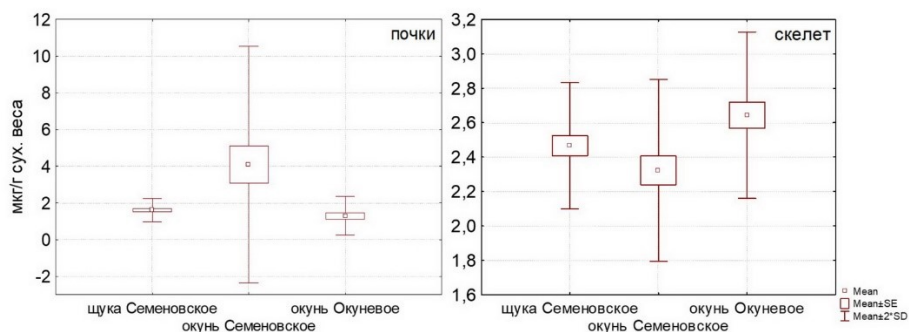


Рис. 9.17. Содержание никеля в мышцах и почках рыб озер Семеновское и Окуновое

Очевидно, это связано с особенностями обменных процессов в организмах рыб. Интенсивность нагрузки на рассматриваемые городские водоемы в отношении никеля ниже по сравнению с оз. Куэтсъярви, в котором средние величины накопления металла в почках щуки в настоящее время достигают 8,14 мг/кг сухой массы.

**Марганец.** Являясь эссенциальным элементом, марганец, как правило, накапливается в значительно более высоких концентрациях в костной ткани и жабрах рыб. Таким образом, интенсивность его накопления в исследованных органах рыб снижалась следующим образом: скелет > жабры > печень > почки > мышцы. В костной ткани рыб оз. Семеновское содержание марганца достигало 61 (щука) и 146 (окунь) мкг/г. Наиболее высокие величины накопления металла в жабрах достигали 42 (щука) и 119 (окунь) мг/кг сухого веса. В печени и почках средние показатели накопления металла находятся в пределах 3,1–11,5 мкг/г, в мышечной ткани — на уровне 0,8–2,8 мг/кг сухого веса (см. табл. 9.1–9.3).

Закономерности накопления Mn в жабрах и костной ткани имеют схожий характер (рис. 9.18), в то же время для мышечной ткани и печени рыб отмечена прямо противоположная закономерность.

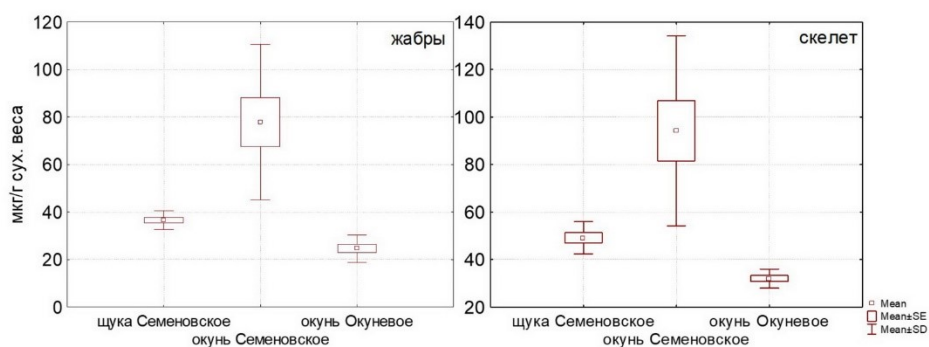


Рис. 9.18. Содержание марганца в жабрах и скелете рыб озер Семеновское и Окуневое

**Цинк.** Характер накопления цинка имеет градиентную последовательность почки > жабры > печень > скелет > мышцы. Как и марганец, он характеризуется значительными содержаниями в исследованных органах.

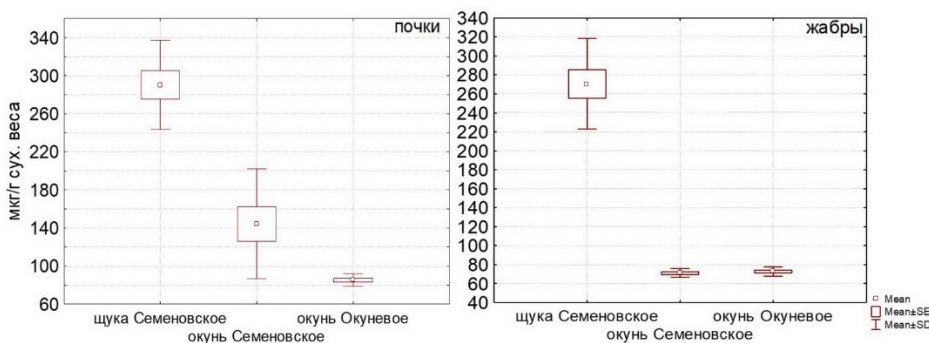


Рис. 9.19. Содержание цинка в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окуневое

В тканях щуки аккумулятивное накопление цинка идет более интенсивно, чем марганца. Средние уровни накопления металла в жабрах окуня оз. Семеновское были практически в 4 раза ниже (71 мг/кг сухого веса) по сравнению со щукой (270) (см. табл. 9.1–9.3). Концентрация цинка в почках щук из оз. Семеновское также практически двукратно превышала аналогичный показатель у окуня того же водоема (рис. 9.19). Характер нагрузки цинка на организмы рыб исследованных озер имеет схожий характер. При сравнении интенсивности накопления цинка и марганца можно отметить сопоставимый уровень нагрузки по указанным элементам на озера г. Мурманска с интенсивно загрязняемым водоемом — оз. Куэтсьярви.

**Кобальт** относится к числу микроэлементов, участвующих в значительном количестве обменных процессов. В целом уровни его накопления в исследованных органах рыб были невысоки и снижались следующим образом: почки > печень > жабры > скелет > мышцы. Максимальные показатели аккумулятивного накопления кобальта у отдельных рыб достигали 1,3 мг/кг (щука, почки) оз. Семеновское и 2,23 мг/кг (окунь, печень) оз. Окунево. Характер накопления металла в печени и почках все же кардинально отличается, что может быть обусловлено как межвидовой изменчивостью обменных процессов рыб, так и внутривидовыми различиями процессов роста и питания окуня рассматриваемых озер (рис. 9.20).

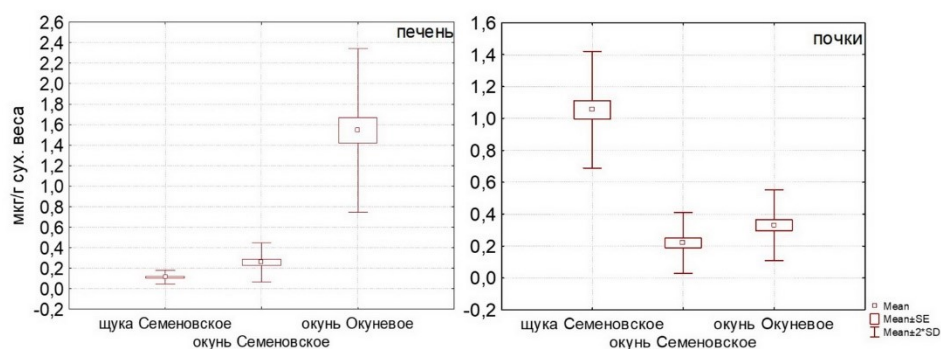


Рис. 9.20. Содержание кобальта в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окунево

Для **свинца** отмечена последовательность снижения содержания в ряду: жабры > почки > скелет > печень > мышцы. У щук наиболее высокое содержание было отмечено в жабрах (1,89 мкг/г), у окуня оно зафиксировано в почках — 3,28 и 1,5 мг/кг сухого веса в озерах Семеновское и Окунево соответственно (см. табл. 9.1–9.3). В органах с максимальным уровнем накопления металла отмечены аналогичные для рассматриваемых водоемов и видов рыб закономерности (рис. 9.21).

**Хром.** В накоплении хрома в организмах рыб не было выявлено четкой градиентной последовательности. У щуки и окуня оз. Семеновское максимальные средние содержания металла отмечались в почках (1,3 и 4,85 мкг/г), для окуня оз. Окунево характерна практически одинаковая концентрация хрома в жабрах, скелете, мышцах и печени (на уровне 1,22–1,63 мкг/г). В то же время наиболее интенсивно накопление хрома происходит у окуня оз. Семеновское (рис. 9.22). Отмечено, что у 40 % особей в выборке содержание металла в почках находится на уровне 7,75–9,45 мг/кг сухого веса.

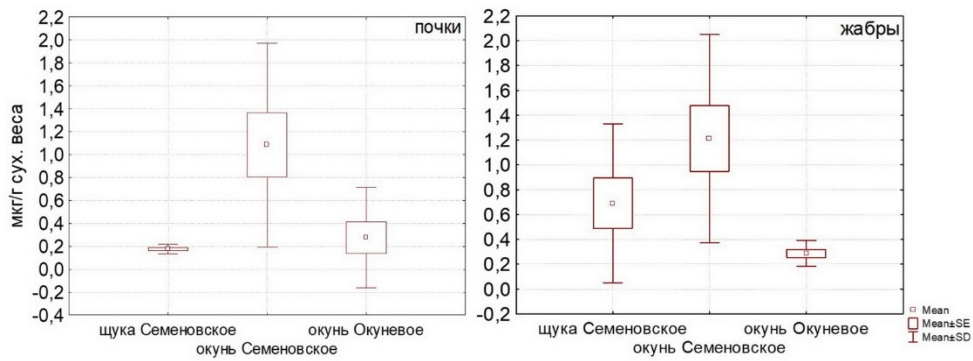


Рис. 9.21. Содержание свинца в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окуновое

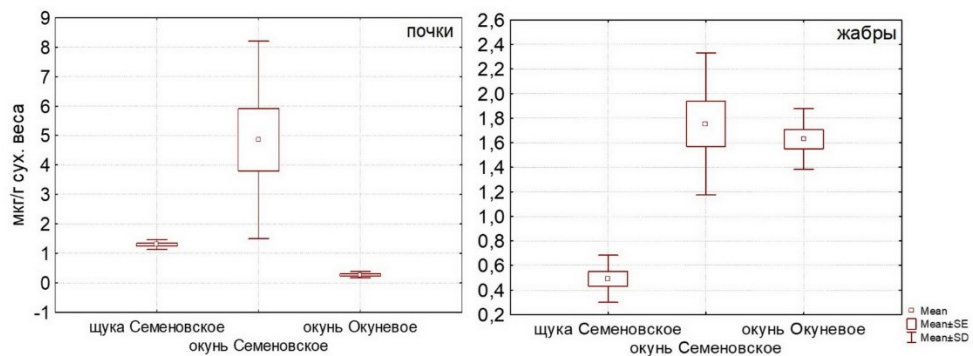


Рис. 9.22. Содержание хрома в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окуновое

**Стронций** относится к числу элементов, накапливающихся в организмах рыб в достаточно значительном количестве. Средние концентрации металла в скелете рыб озер г. Мурманска варьируют в пределах 183–218 мкг/г, в жабрах — 85–123 мкг/кг сухого веса (см. табл. 9.1–9.3). В особенности интенсивно данный элемент накапливается в костной ткани. Его содержание снижается в ряду: скелет > жабры > почки > печень > мышцы. Для стронция также выявлены противоположные закономерности аккумуляирования в рассматриваемых органах окуня и щуки (рис. 9.23).

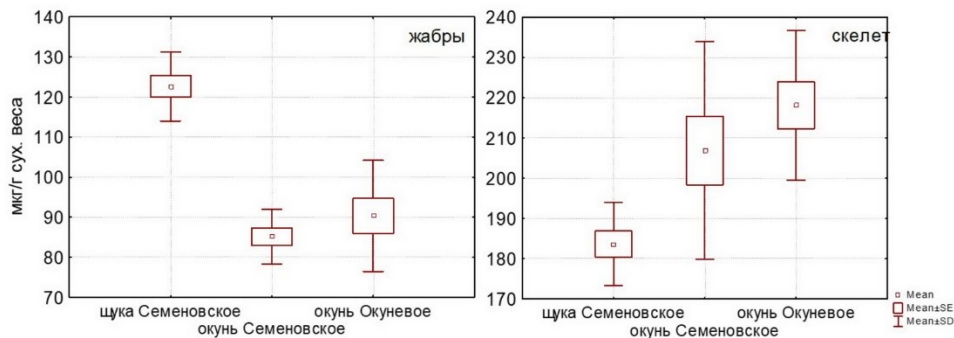


Рис. 9.23. Содержание стронция в жабрах и скелете рыб озер Семеновское и Окуновое

Обращает на себя внимание уровень накопления **ванадия** в органах окуня оз. Семеновское (рис. 9.24): средние концентрации достигали 68 (почки) и 24,4 мг/кг сухого веса (жабры). В целом характер накопления металла у рыб данного водоема соответствует последовательности: почки > жабры > печень > скелет > мышцы. В то же время у окуня оз. Окуноевое наиболее высокие показатели аккумуляции ванадия зарегистрированы в скелете и печени. Очевидно, что нагрузка на водоем, которая связана с его поступлением от предприятий энергетического комплекса, выше для оз. Семеновское. В то же время можно отметить и значительную разницу в уровнях накопления металла у разных видов рыб в одном водоеме, обусловленную, по-видимому, особенностями питания.

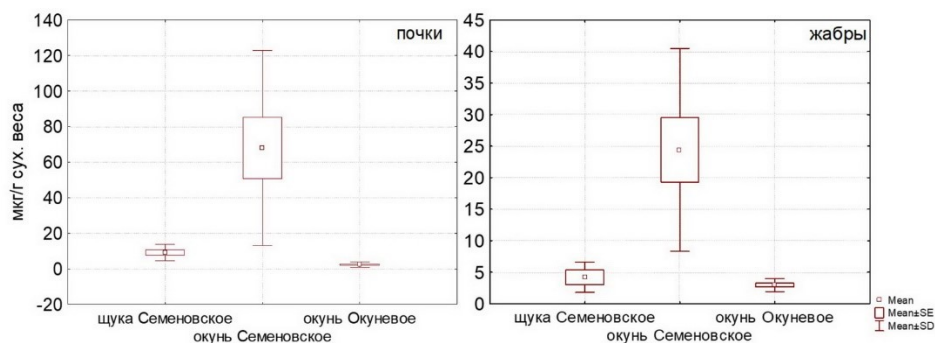


Рис. 9.24. Содержание ванадия в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окуноевое

**Кадмий** относится к одним из распространенных поллютантов наземных и водных экосистем (Моисеенко, Гашкина, 2018). Несмотря на относительно низкие величины накопления в исследованных органах и тканях рыб, его токсическое влияние на живые организмы способно проявляться и в сублетальных концентрациях (Назарова, 2010). Интенсивность его аккумуляции у рыб снижается в ряду: печень > почки > жабры > скелет > мышцы.

Максимальное содержание металла в печени окуня оз. Окуноевое достигало 4,1 мг/кг сухого веса, в почках щуки оз. Семеновское — 1,1 мг/кг сухого веса (см. табл. 9.3). Несмотря на значительную разницу в уровне накопления кадмия в почках и печени рыб, характер аккумуляции металла у рыб исследованных водоемов не имеет общих закономерностей (рис. 9.25).

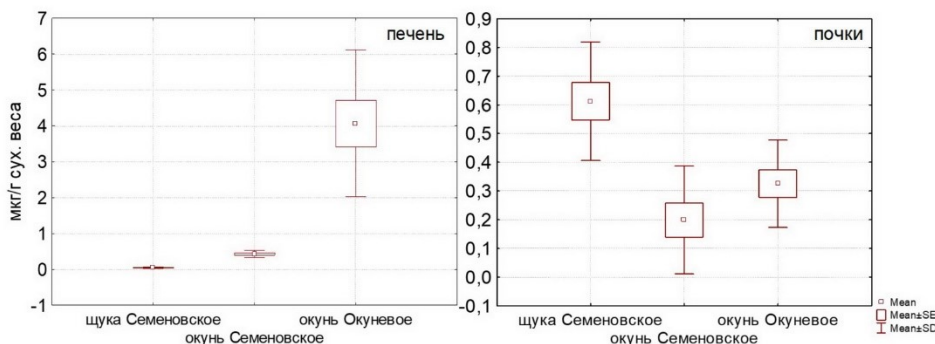


Рис. 9.25. Содержание кадмия в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окуноевое

Аккумуляция **молибдена** в органах и тканях рыб снижалась следующим образом: печень > почки > скелет > жабры > мышцы. Максимальные концентрации элемента в печени щуки и окуня обоих озер лежали в пределах 0,6–1,1 мг/кг сухого веса. Содержание молибдена в остальных органах варьирует от 0,01 до 0,1 мкг/г. Как и для ранее рассматриваемого элемента, характер накопления молибдена в печени и почках отличается противоположной направленностью (рис. 9.26).

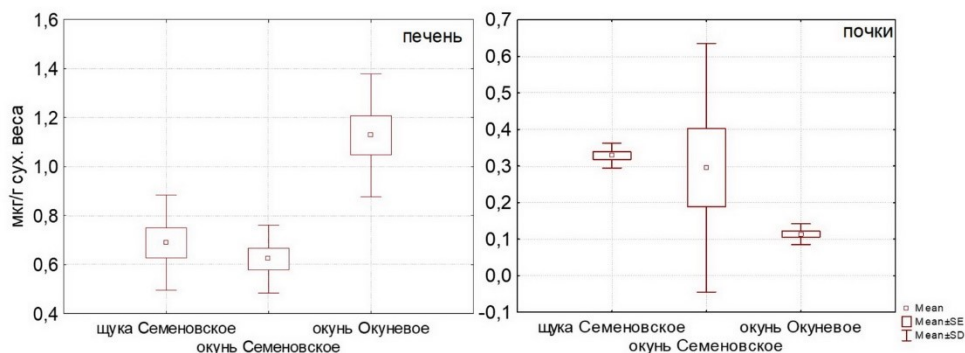


Рис. 9.26. Содержание молибдена в печени и почках рыб озер Семеновское и Окунево

**Сурьма.** Среди рассматриваемых элементов содержание сурьмы отличается значительно более низкими концентрациями в организмах рыб. Несмотря на это, средние показатели накопления элемента в зависимости от исследуемого органа рыб изменялись в пределах одного порядка (от 0,003 мг/кг в мышечной ткани до 0,05 мг/кг в почках). Содержание сурьмы в жабрах и почках рыб имеет схожий характер, что и мышечной ткани (рис. 9.27).

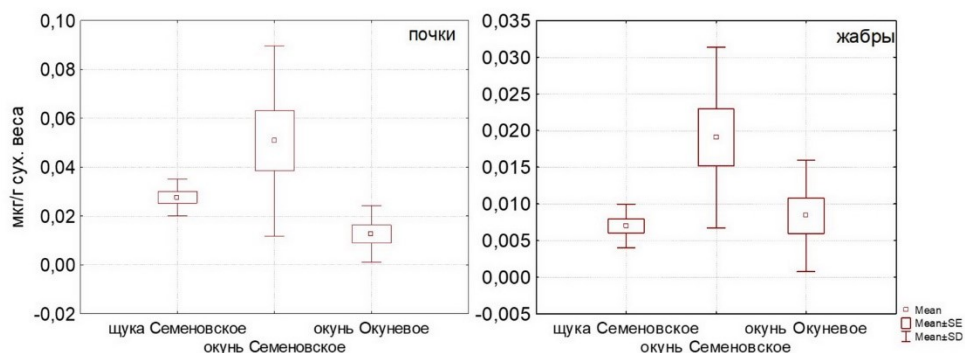


Рис. 9.27. Содержание сурьмы в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окунево

**Вольфрам.** Как и в случае с сурьмой, содержание данного элемента было незначительным и характеризуется варьированием в пределах 0,006–0,07 мкг/г. Наиболее высокие средние концентрации металла встречались в костной ткани окуня оз. Семеновское (0,069 мкг/г) и почках окуня оз. Окунево (0,073 мкг/г). Минимальные значения зарегистрированы в мышечной ткани (см. табл. 9.1–9.3). Следует отметить, что закономерности накопления рассматриваемого элемента



могут определяться различиями условий обитания и питания в водоемах, поскольку интенсивность аккумуляции даже у рыб одного вида (окунь) демонстрирует противоположную направленность в разных озерах (рис. 9.28).

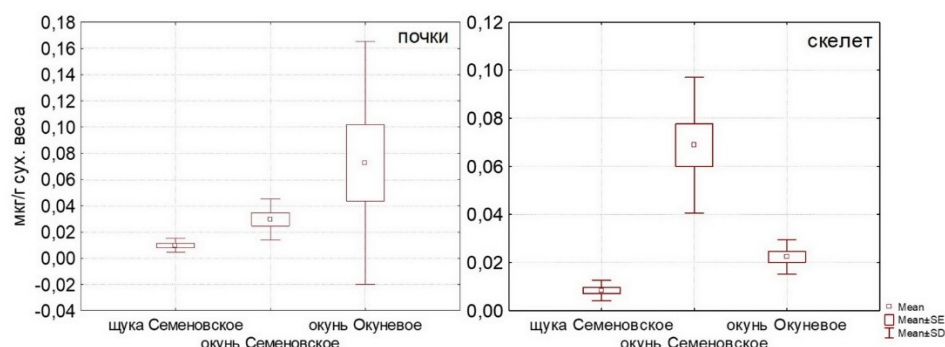


Рис. 9.28. Содержание вольфрама в почках и жабрах рыб озер Семеновское и Окуновое

**Оценка уровня биодоступности тяжелых металлов для живых организмов по отношению их содержания в донных отложениях.** Величина биологической аккумуляции металлов, представленная как отношение содержания элемента в органе рыбы к ее содержанию в верхних слоях донных отложений, может быть использована для оценки антропогенной нагрузки на водоем (Bioaccumulation..., 2021).

Проведенный анализ показал, что в зависимости от конкретного органа рыб интенсивность биологического накопления металлов в организме существенно различается. В мышечной ткани наиболее высокие значения коэффициента биологического накопления отмечены для цинка, хрома и меди (рис. 9.29). Это связано с более высокой степенью аккумуляции указанных элементов в мышцах рыб. Для остальных металлов величины рассматриваемого коэффициента были ниже, но находились в достаточно широком диапазоне (0,004–0,07). Следует отметить, что величина  $K_{до}$  для таких элементов, как Cu, Cr, Zn, Cd, Co, Sb, V, была выше у окуня оз. Окуновое, нежели у рыб оз. Семеновское.

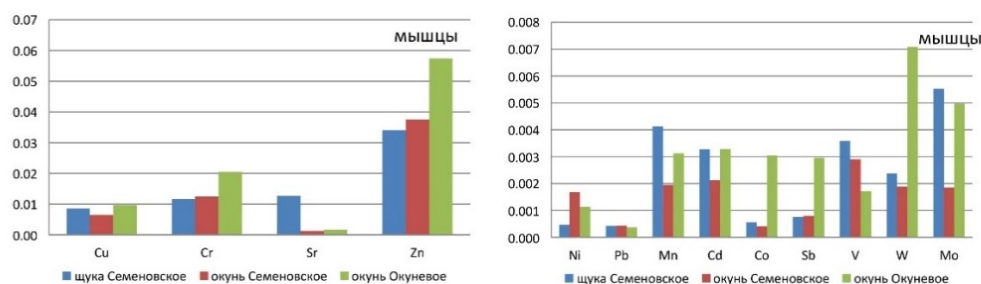


Рис. 9.29. Динамика коэффициента биологического накопления элементов в мышцах рыб исследованных водоемов (на основе содержания металлов в верхнем слое донных отложений)

Степень биоаккумуляции металлов в печени несколько отличается от мышечной ткани, тем не менее здесь сохраняется закономерность, которая свидетельствует о более высокой интенсивности нагрузки на оз. Окуновое

(рис. 9.30). Обращает на себя внимание высокий показатель бионакопления кадмия у окуня вышеуказанного водоема (2,55). Величинами  $K_{до}$  свыше 0,01 характеризовались Cr, Mn и V.

В почках рыб наблюдаемая ранее закономерность не прослеживается. Достаточно высокие показатели  $K_{до}$  характерны для меди, цинка, кадмия, ванадия и молибдена, в особенности у щук оз. Семеновское (рис. 9.31). Степень биоаккумуляции остальных элементов, за исключением кобальта, была выше у окуня исследованных озер.

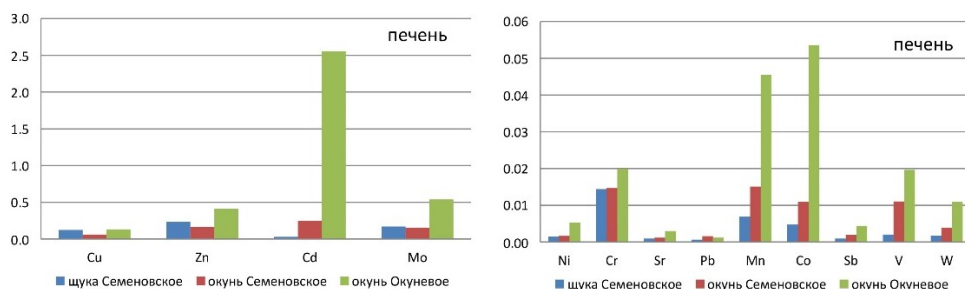


Рис. 9.30. Динамика коэффициента биологического накопления элементов в печени рыб исследованных водоемов (на основе содержания металлов в верхнем слое донных отложений)

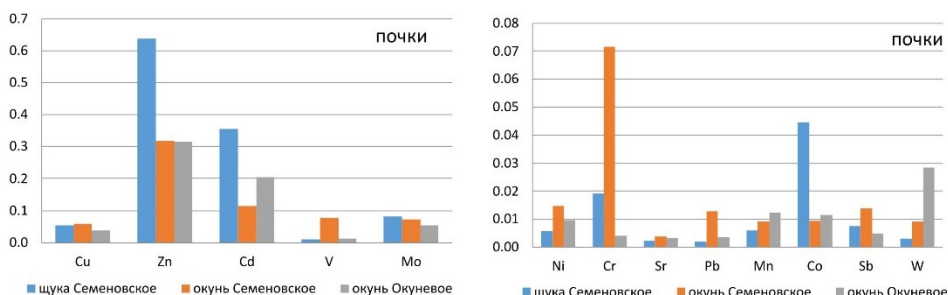


Рис. 9.31. Динамика коэффициента биологического накопления элементов в почках рыб исследованных водоемов (на основе содержания металлов в верхнем слое донных отложений)

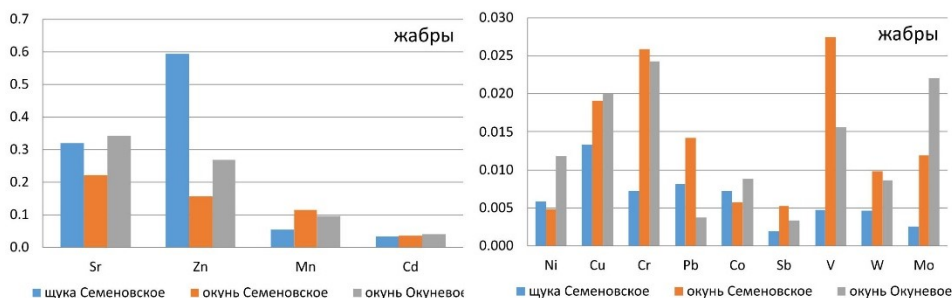


Рис. 9.32. Динамика коэффициента биологического накопления элементов в жабрах рыб исследованных водоемов (на основе содержания металлов в верхнем слое донных отложений)

Для жабр степень бионакопления таких металлов, как Mn, Ni, Cu, Cr, Sb, V, W, Mo и отчасти Sr, Pb и Co, была выше у представителей семейства окуневых (рис. 9.32), лишь для цинка она была выше у щуки (0,6).

В костной ткани по интенсивности биоаккумуляции доминирует окунь оз. Окуневое (рис. 9.33). Величина рассматриваемого показателя у окуня двух озер была выше по сравнению со щукой для 70 % рассматриваемых элементов, лишь для свинца значение коэффициента биологического накопления было выше у щуки.

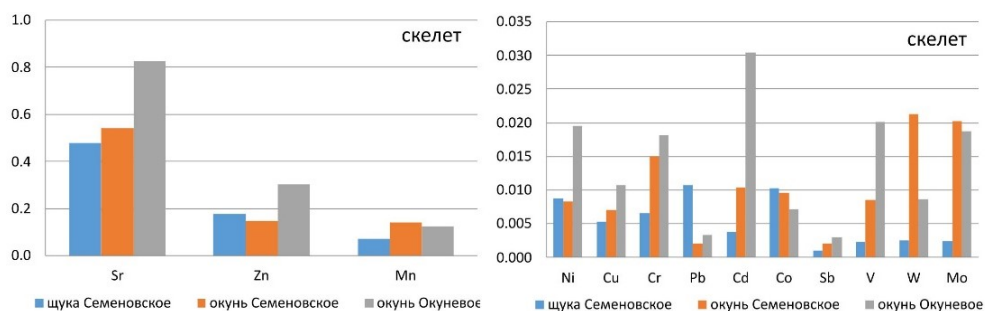


Рис. 9.33. Динамика коэффициента биологического накопления элементов в скелете рыб исследованных водоемов (на основе содержания металлов в верхнем слое донных отложений)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мурманск — столица Мурманской области с населением около 300 тысяч человек и самый крупный город за Северным полярным кругом. Исследования озерных экосистем Мурманска показали, что влияние урбанизированной среды, которое складывается из совокупности воздействия на природу промышленности, транспорта, городской застройки и ряда других факторов, сильно изменило состояние водных объектов по сравнению с множеством ранее изученных озер в Арктической зоне, в том числе на территории Кольского Севера. Основными источниками загрязнения окружающей среды г. Мурманска и озер, расположенных на его территории, являются выбросы мазутных котельных и ТЭЦ, угольный порт, выбросы автомобильного и железнодорожного транспорта, а также влияние дальнего переноса загрязняющих веществ от промышленных предприятий Мурманской области и соседних регионов России и других стран Европы.

В результате исследования гидрохимического состава городских озер Мурманска установлено, что химический состав воды озер претерпел значительные изменения. Увеличились значения pH воды по сравнению с фоновыми, что связано с разрушением элементов городских зданий и сооружений, с использованием реагентов для противогололедной обработки городских дорог и поступлением в повышенных содержаниях главных катионов щелочных и щелочноземельных металлов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ ), а также главных анионов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Минерализация воды в мурманских озерах в десятки раз превышает показатели, зафиксированные в озерах северо-восточной части Мурманской области водосбора Баренцева моря.

Из-за антропогенного влияния, в частности поступления и разложения нефтепродуктов, в воде городских озер значительно увеличилось содержание соединений азотной группы, особенно аммоний-иона, что говорит о формировании восстановительной обстановки, губительно действующей на гидробионтов. Наиболее загрязненным среди исследованных озер является Ледовое, в меньшей степени — Южное, которое характеризуется наибольшим содержанием вышеперечисленных показателей, а также многих тяжелых металлов (Ni, Cu, Zn, Co, As, Mo и W). В то же время здесь отмечается наименьшее содержание органических веществ в связи с угнетением биологических процессов в самих озерах (уменьшение образования автохтонного органического материала), а также с тем, что водные массы озер формируются за счет поверхностного стока с городской территории, в меньшей степени покрытой почвенно-растительным слоем по сравнению с природными условиями (снижение поступления аллохтонного органического материала).

Донные отложения озер г. Мурманска характеризуются повышенным содержанием тяжелых металлов, в частности, выявлено превышение регионального геохимического фона и кларка земной коры по V, Ni, Sb, Pb, Sn, Cd, Mo и другим элементам. Наиболее загрязненными являются озера Ледовое, Семеновское и Среднее. Вертикальное распределение тяжелых металлов в колонках современных донных отложений демонстрирует историческое увеличение уровня антропогенной нагрузки на озера: по геохимии донных

отложений фиксируется момент образования города, начало работы мазутной ТЭЦ и котельных города, а также влияние выбросов автомобильного транспорта, который использовал в топливе соединения свинца. Практически во всех озерах донные отложения «обогащены» нефтяными углеводородами. Наибольшими концентрациями этого вида загрязнителей характеризуются отложения оз. Ледовое, которое расположено в центре г. Мурманска и испытывает влияние АЗС, автомастерских и стоянок автомобильного транспорта. Вертикальное распределение концентраций нефтяных углеводородов в отложениях озер г. Мурманска показывает, что наибольшее их поступление в урбанизированные водоемы и аккумуляция в осадках происходила в годы наиболее активного освоения территории и, как следствие, наибольшего уровня антропогенной нагрузки.

Исследования численности бактериоценоза озер г. Мурманска показали, что значения этого показателя в воде сравнительно невысоки: максимумы были отмечены в 2020 г. — Ледовое и Южное и 2021 г. — Окуневое. При этом численность бактериоценоза в донных отложениях озер на три порядка выше, чем в водной толще. Все озера по показателю общей численности бактерий можно отнести к олиго- или мезотрофному типу, по показателю коэффициента сапробности и санитарно-микробиологическим характеристикам — к чистым, исключение составляет оз. Ледовое, показатель сапробности которого свидетельствует о довольно высоком уровне микробиологического загрязнения воды, что подтверждается высокой численностью гетеротрофной составляющей и наличием бактерий группы кишечной палочки. Превышение норматива по численности бактерий кишечной палочки было отмечено и в оз. Окуневое, которое используется местным населением в рекреационных целях.

За период исследований в планктоне озер г. Мурманска было выявлено 210 таксонов водорослей и цианобактерий рангом ниже рода. Структура сообществ фитопланктона исследованных озер отличается присутствием значительной доли цианопрокариот, включая виды, способные вызывать цветение воды и являющиеся потенциально токсичными для водных организмов и человека. В некоторых водоемах в отдельные годы была зарегистрирована высокая доля динофлагеллят и золотистых водорослей. Наблюдаемые изменения во многом оказались обусловлены гидрохимическими факторами, в первую очередь динамикой содержания биогенных элементов. Например, в 2018 г. максимальные концентрации соединений фосфора и азота в оз. Ледовое обусловили массовое развитие фитопланктона и экстремально высокий уровень биомассы в обозначенный период. В последующие годы наблюдалось резкое снижение фосфатов, общего фосфора и аммиачного азота в воде озера, что привело к уменьшению биомассы фитопланктона. Сезонные наблюдения за фитопланктоном оз. Семеновское позволили установить, что его биомасса в значительной степени определяет величину рН. Кроме того, в периоды максимального развития фитопланктона отмечается снижение содержания нитратов, фосфатов и кремния в поверхностных слоях воды. В целом исследования динамики показателей фитопланктона привели к следующим выводам: водоемы г. Мурманска, подверженные сравнительно высокой антропогенной нагрузке, отличаются наиболее резкими изменениями структурно-функциональных показателей сообществ фитопланктона от года к году.

В составе зоопланктона озер г. Мурманска выявлено 34 таксона видового ранга. Несмотря на некоторую трансформацию в сообществе зоопланктона, для исследуемых водоемов характерен обедненный и однородный состав

зоопланктонного сообщества с количественным преобладанием коловраток над низшими ракообразными («тонкими» и «грубыми» фильтраторами). Исследуемые водные объекты характеризуются как мезосапробные и относятся к III классу качества вод — «умеренно загрязненные». Установлено, что структурно-функциональные показатели зоопланктонного сообщества наряду с фитопланктонными хорошо отражают степень антропогенной нагрузки на водные объекты.

Исследования макрозообентоса городских озер позволило выявить 35 систематических групп беспозвоночных разного ранга. Наиболее неблагоприятными условиями для развития донной фауны характеризовались озера Ледовое и Южное. С другой стороны, оз. Окуновое по составу макрозообентоса наиболее близко к водоемам незагрязненных районов северотаежной зоны Мурманской области. Оценка экологического состояния водоемов с использованием Кольского биотического индекса и олигохетного индекса Гуднайта — Уитлея показала, что уровень загрязнения большинства водоемов по этим показателям можно оценить как «умеренно загрязненные» и «грязные», за исключением оз. Окуновое, воды которого можно отнести к категории «чистые». В целом же структура зообентоса, характеризующаяся в большинстве исследованных водоемов низкой выравненностью и выраженным доминированием отдельных систематических групп, свидетельствует о довольно неблагоприятных условиях для обитания гидробионтов.

Изучение диатомовых комплексов современных донных отложений оз. Семеновское позволило получить сведения о развитии водоема за последние 150 лет, что хорошо коррелирует с аналогичными исследованиями геохимии донных отложений городского водоема. Для колонки отложений оз. Семеновское выявлены значительные изменения видового состава и структуры диатомовых комплексов, что проявляется в смене доминирующей группы видов, исчезновении видов, господствующих в нижних слоях колонки, и формировании новых доминантов. Историческая динамика экологической структуры диатомей отражает развитие процессов защелачивания, увеличение общей минерализации воды, эвтрофирование. Такие изменения в составе диатомового комплекса можно объяснить влиянием антропогенного фактора на экосистему водоема, что подтверждается обнаружением в изученных слоях донных отложений озера повышенных концентраций тяжелых металлов (ванадия, никеля, свинца, кадмия) и других загрязнителей.

Исследования ихтиоценозов озер г. Мурманска выявили, что оз. Большое относится к сигово-лососевому водоему, кумжа здесь является типичным бентофагом и в незначительной мере хищником. Щука и речной окунь — ядро ихтиоценоза оз. Семеновское, в желудках последнего в основном обнаруживался крупный ракообразный зоопланктон.

Озеро Окуновое является окуновым водоемом. Для «хозяина» водоема характерно смешанное питание (зоопланктонные и бентосные организмы), он имеет значимо меньшие темпы наблюдаемого линейно-весагого роста, чем окунь из оз. Семеновское. Высокие темпы роста которого обусловлены большей продуктивностью водоема (нежели оз. Окуновое), вызванной его антропогенным загрязнением. Отсутствие промысловых видов рыб в оз. Ледовое объясняется сильным загрязнением водоема, что подтверждено как химическими, так и биологическими методами.

Анализ химического состава органов и тканей рыб озер г. Мурманска показал, что для органов-мишеней (печень, почки, жабры), где металлы накапливаются интенсивнее, характерны более высокие содержания в организме окуня (Ni, Mn, Pb, Cr, V, Sb — оз. Семеновское), (Co, Mo, Cd, W, Sr — оз. Окуневое). Содержание меди (печень) и цинка (почки) были выше у щук оз. Семеновское, например, отмечается, что величина накопления меди в органах и тканях рыб снижалась в такой последовательности: печень > почки > жабры > скелет > мышцы.

Уровень накопления меди в органах-мишенях (где накопление металла максимально) окуня и щуки (печень и почки) в целом сопоставим с наиболее интенсивно загрязняемым водоемом региона — оз. Куэтсъярви (северо-западная часть Мурманской области).

Таким образом, комплексные исследования городских озер Мурманской области на примере самой большой урбанизированной территории региона показали, что такие водоемы отличаются от водоемов условно фоновых районов Арктической зоны, что во многом определяется влиянием антропогенных факторов. Необходимо продолжать экологический мониторинг исследованных водных объектов и параллельно разрабатывать комплекс мер по организации мер защиты городских водных экосистем Арктической зоны России с учетом большого запроса современного общества на создание комфортной среды для проживания людей на Севере.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агроэкологическая характеристика урбоземов заполярного города Мурманска / М. И. Вихман, А. А. Ингрии, Е. Е. Кислых, Л. А. Лисеенко // *Агрохимический вестник*. 2009. № 5. С. 31–33.
2. *Акулова, А. Ю.* Современное состояние гетеротрофных бактериоценозов Косинского Трехозерья : специальность 03.02.08 «Экология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Акулова Анастасия Юрьевна ; [Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова]. Москва, 2017. 260 с.
3. *Алекин, О. А.* Основы гидрохимии / О. А. Алекин. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
4. *Александрова, Е. Ю.* Сравнительная характеристика почвы и растительности поселка Дальние Зеленцы и территорий города Мурманска / Е. Ю. Александрова, А. А. Троценко, М. В. Светлова // *Международ. науч.-исследоват. журн.* 2020. № 3 (93), ч. 1. С. 129–132.
5. *Алисов, Б. П.* Климат СССР : учебное пособие для вузов / Б. П. Алисов. Москва : Изд-во МГУ, 1969. 104 с.
6. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / ответственный редактор Т. И. Моисеенко. Москва : Наука, 2002. 403 с.
7. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под редакцией П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. Санкт-Петербург : Нестор-История, 2017. 272 с.
8. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Баренцева моря) : монография : в 2 частях / Н. А. Кашулин, С. С. Сандимиров, В. А. Даувальтер [и др.]. Апатиты : КНЦ РАН, 2010.
9. *Апасова, Е. Г.* Описание массива данных суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния на станциях России / Е. Г. Апасова, Л. К. Клещенко // *Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных* : [офиц. сайт]. URL: <http://meteo.ru/data/160-sunshineduration#описание-массива-данных> (дата обращения: 08.02.2022).
10. Атлас Мурманской области [карты] / редакционная коллегия: главный редактор канд. геогр. наук А. Г. Дуров [и др.]. Москва, 1971. 33 с.
11. Атомно-абсорбционное определение содержания металлов в нефтяных топливах / А. Н. Приваленко, Г. М. Балак, Э. К. Баграмова [и др.] // *Международ. науч.-исследоват. журн.* 2013. № 5. С. 97–108.
12. *Базова, М. М.* Особенности формирования элементного состава вод Кольского Севера в условиях функционирования горнорудных производств / М. М. Базова // *Геохимия*. 2017. № 1. С. 92–106. <https://doi.org/10.7868/S0016752517010022>.
13. *Баканов, А. И.* Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов / А. И. Баканов // *Биология внутренних вод*. 2000. № 1. С. 68–82.
14. *Балушкина, Е. В.* Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных / Е. В. Балушкина, Г. Г. Винберг // *Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер*. Ленинград, 1979. С. 58–72.



15. *Барышев, И. А.* Влияние городских стоков на бентосных беспозвоночных пороговых участков реки Лососинка / И. А. Барышев, В. В. Хренников, В. К. Лузгин // Биология внутренних вод. 2001. № 4. С. 73–78.
16. *Белкина, Н. А.* Закономерности осадконакопления и раннего диагенеза донных отложений в водоемах юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита : специальность 25.00.36 «Геоэкология» : диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Белкина Наталья Александровна ; Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена. Санкт-Петербург, 2021. 294 с.
17. *Белкина, Н. А.* Распределение и трансформация нефтяных углеводородов в донных отложениях Онежского озера / Н. А. Белкина, А. В. Рыжиков, Т. М. Тимакова // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 4. С. 472–481.
18. *Беляков, В. П.* Структурно-функциональные характеристики зообентоса озер, расположенных в природных и урбанистических ландшафтах Северо-Западного региона России / В. П. Беляков, А. И. Бажора // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2016. Т. 4, № 9. С. 484–498.
19. *Беляков, В. П.* Мониторинг экологического состояния городских водоемов Санкт-Петербурга по показателям зообентоса / В. П. Беляков, А. И. Бажора, И. В. Сотников // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 51–56.
20. Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России / Российская акад. наук, Ботанический ин-т им В.Л. Комарова ; Р. Н. Белякова, Л. Н. Волошко, О. В. Гаврилов [и др.]. Москва : Товарищество науч. изд. КМК, 2006. 367 с.
21. *Беус, А. А.* Геохимия окружающей среды / А. А. Беус, Л. И. Грабовская, Н. В. Тихонова. Москва : Недра, 1976. 248 с.
22. *Битюкова, В. Р.* Экологический портрет российских городов / В. Р. Битюкова, Н. С. Касимов, Д. В. Власов // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 6–18.
23. *Богданова, О. Ю.* Распределение гетеротрофных бактерий в воде озер Кольского района Верхнетуломского водохранилища в 2006–2007 гг. / О. Ю. Богданова // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : Междунар. науч.-практ. конф. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2015. С. 8–14.
24. *Большаков, Г. Ф.* Азоторганические соединения нефти / Г. Ф. Большаков. Новосибирск : Наука, 1988. 216 с.
25. *Бульон, В. В.* Взаимосвязь между численностью бактерий и содержанием хлорофилла в планктоне пресных вод / В. В. Бульон, Е. Б. Павельева // Микробиология. 1998. Т. 67, № 2. С. 261–266.
26. *Вагнер, Б. Б.* Озера и водохранилища Московского региона : учеб. пособие по курсу «География и экология Московского региона» / Б. Б. Вагнер, В. Т. Дмитриева. Москва : МГПУ, 2004. 105 с.
27. *Валькова, С. А.* Таксономический состав и структура макрозообентоса разнотипных водоемов Зеленого пояса Фенноскандии в пределах Мурманской области / С. А. Валькова // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Биogeография. 2020. № 1. С. 56–70.
28. *Галахов, А. В.* Петрология Хибинского щелочного массива / А. В. Галахов. Ленинград : Наука, 1975. 256 с.

29. Генеральный план муниципального образования город Мурманск. Омск, 2015. 168 с.
30. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба (Петрозаводск, Карелия) / З. И. Слуковский, В. Н. Ильмаст, И. В. Суховская [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. Т. 5, № 10. С. 45–63. <https://doi.org/10.17076/lim618>.
31. Геохимия и минералогия геосистем крупных городов : материалы междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 18–19 сентября 2013 г.). Санкт-Петербург : ВВМ, 2013. 88 с.
32. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин [и др.]. Москва : Недра, 1990. 335 с.
33. Геоэкология городских озер Мурманска / В. А. Даувальтер, З. И. Слуковский, Д. Б. Денисов, А. А. Черепанов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 153–157. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.028>.
34. Герасимов, Ю. Л. Современное экологическое состояние некоторых прудов г. Самары / Ю. Л. Герасимов, Е. В. Захаров, А. В. Синицкий // Вестник Самарского госуниверситета, 2003. № 5. С. 196–204.
35. Гонтарь, О. Б. Скверы города Мурманска — экологические маршруты для изучения природы и истории родного края / О. Б. Гонтарь, О. А. Макарова, Е. Ф. Дудакова // Экологическое краеведение : материалы науч.-практ. конф. Ишим : Изд-во ИПИ им. П. П. Ершова, 2016. С. 146–152.
36. Горленко, В. М. Экология водных микроорганизмов / В. М. Горленко, Г. А. Дубинина, С. И. Кузнецов. Москва : Наука, 1977. 289 с.
37. Горохова, О. Г. Состав и структура сообществ фитопланктона реки Самары (бассейн Саратовского водохранилища) / О. Г. Горохова // Ученые записки Казан. университета, 2020. Т. 162, кн. 3. С. 413–429.
38. Гусева, К. А. К методике учета фитопланктона / К. А. Гусева // Труды Ин-та биологии водохранилищ. Ленинград, 1959. Т. 2. С. 44–51.
39. Давыдова, Н. Н. Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене / Н. Н. Давыдова. Ленинград : Наука, 1985. 244 с.
40. Даувальтер, В. А. Геохимия озер в зоне влияния Арктического железорудного предприятия / В. А. Даувальтер // Геохимия. 2020. Т. 65, № 8. С. 797–810. <https://doi.org/10.31857/S001675252008004X>.
41. Даувальтер, В. А. Геохимия редкоземельных элементов в озере Имандра, Мурманская область / В. А. Даувальтер, Т. И. Моисеенко, И. В. Родюшкин // Геохимия. 1999. № 4. С. 376–383.
42. Даувальтер, В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики: природоохранные аспекты проблемы : специальность 11.00.11 «Охрана окружающей среды и хозяйственное использование природных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Даувальтер Владимир Андреевич. Апатиты, 1999. 398 с.
43. Даувальтер, В. А. Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита / В. А. Даувальтер, Б. П. Ильяшук // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684.
44. Демин, В. И. Изменения температуры воздуха в Мурманске с начала XIX века / В. И. Демин, А. Р. Анциферова, О. И. Мокротоварова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 20. С. 113–125.

45. *Демин, В. И.* Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических наблюдений / В. И. Демин // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2012. Т. 9, № 2. С. 98–110.
46. *Денисов, Д. Б.* Современное состояние водорослевых сообществ планктона в зоне влияния Кольской АЭС (оз. Имандра) / Д. Б. Денисов, Н. А. Кашулин // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2013. Т. 16, № 3. С. 68–94.
47. *Денисов, Д. Б.* Фитопланктон водоемов Мурманской области в зонах влияния металлургической промышленности / Д. Б. Денисов // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2019. Т. 10, № 4. С. 94–108. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.94-108.
48. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 1998 году. Мурманск : КаэМ, 1999. 197 с.
49. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 1999 году. Мурманск : КаэМ, 2000. 217 с.
50. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2000 году. Мурманск : КаэМ, 2001. 203 с.
51. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2002 году. Мурманск : КаэМ, 2003. 128 с.
52. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2003 году. Мурманск : КаэМ, 2004. 138 с.
53. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2004 году. Мурманск : КаэМ, 2005. 128 с.
54. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2005 году. Мурманск : КаэМ, 2006. 120 с.
55. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2006 году. Мурманск : КаэМ, 2007. 160 с.
56. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2007 году. Мурманск : КаэМ, 2008. 147 с.
57. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2008 году. Мурманск : Кн. изд-во, 2009. 152 с.
58. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2009 году. Мурманск : Кн. изд-во, 2010. 152 с.
59. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2010 году. Мурманск : Рекламное агентство XXI век, 2011. 152 с.
60. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2011 году. Мурманск : Ростсервис, 2012. 152 с.
61. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2012 году. Мурманск : ИП Щербаков Максим Леонидович, 2013. 152 с.
62. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2013 году. Нижний Новгород, 2014. 152 с.
63. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2014 году. Мурманск, 2015. 177 с.
64. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2015 году. Мурманск, 2016. 166 с.
65. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2016 году. Мурманск, 2017. 180 с.

66. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2017 году. Мурманск, 2018. 165 с.
67. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 году. Мурманск, 2019. 185 с.
68. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2019 году. Мурманск, 2020. 177 с.
69. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 году. Мурманск, 2021. 176 с.
70. Донные отложения Заинского водохранилища / Д. В. Иванов, Р. Р. Шагидуллин, И. И. Зиганшин, Е. В. Осмелкин // Ученые записки Казан. университета. 2011. Т. 153, кн. 1. С. 190–202.
71. Другова Т. П. Сравнительный анализ бриофлоры городов Мурманской области / Т. П. Другова // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. Т. 2, № 1. С. 32–49.
72. Дрябжинский, О. Е. Мониторинг содержания в снеговой воде компонентов противогололедных реагентов и подвижных форм тяжелых металлов / О. Е. Дрябжинский, В. М. Зубкова, Т. Г. Пугачева // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 5. С. 56–69. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-5-56-69>.
73. Евдокимова, Г. А. Изменение интенсивности микробиологических процессов в озере Имандра в связи с его загрязнением / Г. А. Евдокимова // Природа и хозяйство Севера. Вып. 16. 1988. С. 59–66.
74. Евзеров, В. Я. Неиспользованные сырьевые ресурсы Мурманской области / В. Я. Евзеров // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 10, № 2. С. 38–52.
75. Ежегодник состояния экосистем поверхностных вод России (по гидробиологическим показателям) 2016 год / под научной редакцией проф., д-ра биол. наук В. М. Хромова. Москва : Росгидромет, 2017. 191 с.
76. Ежегодник состояния экосистем поверхностных вод России (по гидробиологическим показателям) 2018 год. Москва : Росгидромет, 2019. 133 с.
77. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2011–2015 гг.: обзор данных / П. Ф. Свистов, Н. А. Першина, А. И. Полищук [и др.]. Санкт-Петербург, 2016. 116 с.
78. Закономерности формирования экосистем тундровых озер и их изменение под влиянием антропогенного воздействия / В. Г. Дрябкова, В. П. Беляков, И. А. Денисова [и др.] // Особенности структуры экосистем озер Крайнего Севера. Санкт-Петербург : Наука, 1994. С. 242–248.
79. Иванов, Д. В. Донные отложения озера Средний Кабан города Казани / Д. В. Иванов // Георесурсы. 2012. № 7 (49). С. 19–23.
80. Изменения биоразнообразия поверхностных вод Севера в условиях закисления, евтрофирования и токсичного загрязнения / Т. И. Моисеенко, А. Н. Шаров, О. И. Вандыш [и др.] // Водные ресурсы. 1999. Т. 26, № 4. С. 492–501.
81. Ильинский, В. В. Гетеротрофный бактериопланктон (Экология и роль в процессах естественного очищения среды от нефтяных загрязнений) : специальность 03.00.18 : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Ильинский Владимир Викторович. Москва, 2000. 603 с.

82. Исследования сообществ зоопланктона в озерах города Мурманска / А. А. Черепанов, Д. Б. Денисов, О. И. Вандыш [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 4, № 10. С. 83–93. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.83-93>.
83. *Кабата-Пендиас, А.* Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. Москва : Мир, 1989. 439 с.
84. *Каширская, Е. В.* Современное состояние фауны прудов Заводского района г. Саратова / Е. В. Каширская, И. В. Белова, Ю. А. Малинина // Фауна и экология животных. 1997. № 6. С. 43–51.
85. *Китаев, С. П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / С. П. Китаев. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
86. *Кокош, Ю. Г.* Сезонная динамика содержания формальдегида в атмосферном воздухе городов Беларуси / Ю. Г. Кокош, С. В. Какарека // Природопользование. 2019. № 1. С. 28–36.
87. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрии (ПНД Ф 16.1:2.2.22-98) / [утв. Госкомэкологией России 10.11.1998]. Москва, 1998 : [изд. 2005 г.]. 21 с.
88. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в питьевых, поверхностных и сточных водах методом ИК-спектрии (ПНД Ф 14.1:2:4.5-95). Москва, 1995 : [изд. 2004 г.]. 15 с.
89. Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии / Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, Д. Б. Денисов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 6. 2018. № 9. С. 34–86.
90. *Крайнов, С. Р.* Геохимия редких элементов в подземных водах (в связи с геохимическими поисками месторождений) / С. Р. Крайнов. Москва : Недра, 1973. 296 с.
91. Лицевский урановорудный район / Т. В. Каулина, Е. Н. Афанасьева, В. Л. Ильченко [и др.]. Москва : ГЕОС, 2021. 136 с.
92. Миграция и круговорот серы в субарктическом озере Имандра, загрязняющимся стоками горно-металлургического производства / В. А. Даувальтер, Т. И. Моисеенко, И. В. Родюшкин [и др.] // Геохимия. 1999. № 6. С. 626–636.
93. *Кузнецов, С. И.* Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах / С. И. Кузнецов, А. И. Саралов, Т. Н. Назина. Москва : Наука, 1985. 213 с.
94. *Кузнецов, С. И.* Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах / С. И. Кузнецов. Москва : Наука, 1952. 300 с.
95. *Кузьмин, Г. В.* Таблицы для вычисления биомассы водорослей / Г. В. Кузьмин. Магадан, 1984. 48 с.
96. *Курганов, К. Ю.* Программа инженерно-гидрографических и гидрометеорологических изысканий на озерах Рог-озеро и Большое / К. Ю. Курганов. 2016 URL: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vEa8hKE3nigJ:murmanvoda.ru/documents/Program\\_Rogozero\\_18.12.15.doc+&cd=8&hl=ru&ct=clnk&gl=ru](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vEa8hKE3nigJ:murmanvoda.ru/documents/Program_Rogozero_18.12.15.doc+&cd=8&hl=ru&ct=clnk&gl=ru) (дата обращения: 11.11.2021).

97. *Макрушин, А. В.* Биологический анализ качества вод / А. В. Макрушин. Ленинград, 1974. 60 с.
98. *Малкина, В. Д.* Экологический вопрос в комплексном развитии Мурманского транспортного узла как российской арктической гавани / В. Д. Малкина // Экологический вестник России. 2015. № 4. С. 54–55.
99. *Мартемьянова, Е. С.* Концептуальные основы формирования региональной системы управления отходами производства и потребления / Е. С. Мартемьянова // Вестник МГТУ. 2010. Т. 8, № 2. С. 268–277.
100. Методика и результаты комплексной эколого-геохимической оценки химического загрязнения водных бассейнов / Г. Б. Мелентьев, О. В. Калиничева, Е. Н. Малинина [и др.] // Экология промышленного производства. 2009. № 1. С. 16–29.
101. Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях / Е. В. Боруцкий, И. А. Веригина, М. В. Желтенкова [и др.]. Москва : Наука, 1974. 254 с.
102. Методы экологических исследований водоемов Арктики : монография / С. С. Сандимиров, Л. П. Кудрявцева, В. А. Даувальтер [и др.]. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2019. 180 с.
103. *Минеева, Н. М.* Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ / Н. М. Минеева. Москва : Наука, 2004. 156 с.
104. *Минин, В. А.* Теплоснабжение городов Мурманской области / В. А. Минин // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. Т. 8, № 3. С. 67–77.
105. *Минченко, Е. Е.* Оценка состояния городских водных экосистем по гидробиологическим показателям / Е. Е. Минченко, Н. А. Пахомова // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 48–55.
106. *Минченко, Е. Е.* Оценка экологического благополучия городских водоемов / Е. Е. Минченко, В. Д. Гусева // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Мурманск, 7 апреля 2017 г.) : в 2 частях. Ч. 1 / Мурманский государственный технический университет. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2017. С. 202–210.
107. *Моисеенко, Т. И.* Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, А. А. Лукин [и др.]. Москва : Наука, 2002. 403 с.
108. *Моисеенко, Т. И.* Биогеохимия кадмия: антропогенное рассеивание, биоаккумуляция и экотоксичность / Т. И. Моисеенко, Н. А. Гашкина // Геохимия. 2018. № 8. С. 759–773.
109. *Моисеенко, Т. И.* Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра) / Т. И. Моисеенко, В. А. Даувальтер, И. В. Родюшкин. Апатиты : КНЦ РАН, 1997. 127 с.
110. *Назарова, Е. А.* Последовательность морфопатологических изменений в почках пресноводных костистых рыб при хронической интоксикации солями кадмия / Е. А. Назарова // Токсикологический вестник. 2010. № 4. С. 46–51.
111. Научно-прикладной справочник «Климат России» / ВНИИГИ-МЦД ; В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова [и др.]. URL: <http://meteo.ru/climate/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii> (дата обращения: 08.02.2022).

112. *Никаноров, А. М.* Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах / А. М. Никаноров, А. В. Жулидов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 312 с.
113. *Никаноров, А. М.* Гидрохимия / А. М. Никаноров. 2-е изд. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
114. *Никулина, В. Н.* Фитопланктон / В. Н. Никулина // Биологическая продуктивность северных озер : в 2 частях. Ч. 2 : [Озера Зеленецкое и Акулькино]. Ленинград : Наука, 1975. С. 37–52.
115. Об охране окружающей среды : федер. закон РФ от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/) (дата обращения: 11.11.2020).
116. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России : Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 ВНИИГИ-МЦД / О. Н. Булыгина, В. Н. Разуваев, Л. Т. Трофименко [и др.]. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описаниемассива-данных>.
117. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России : в 2 томах. Т. 2 : [Зообентос] / Российская акад. наук, Зоологический институт ; под редакцией В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолихина. Москва ; Санкт-Петербург, 2016. 457 с.
118. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий : в 6 томах. Т. 5 : [Высшие насекомые] / под общей редакцией С. Я. Цалолихина. Санкт-Петербург : Наука, 2001. 836 с.
119. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий : в 6 томах. Т. 4 : [Двукрылые насекомые] / под общей редакцией С. Я. Цалолихина. Санкт-Петербург : Наука, 2000. 997 с.
120. *Осауленко, В. Е.* Влияние экологических факторов на микробиоту почв Кольского Заполярья : монография / В. Е. Осауленко. Москва : Спутник+, 2012. 160 с.
121. Особенности накопления тяжелых металлов в рыбах малых озер Зеленого пояса Фенноскандии (на территории Мурманской области) / П. М. Терентьев, Е. М. Зубова, Н. А. Кашулин, И. М. Королева // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 5. С. 39–55. <http://dx.doi.org/10.17076/eco1083>.
122. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска / В. А. Даувальтер, З. И. Слуковский, Д. Б. Денисов, А. А. Черепанов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66, № 2. С. 252–266. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>.
123. *Перельман, А. И.* Атомы-спутники / А. И. Перельман. Москва : Наука, 1990. 176 с.
124. *Перетрухина, А. Т.* Состояние лентических экосистем в рекреационных зонах города Мурманска / А. Т. Перетрухина, В. Е. Осауленко // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : междунар. науч.-практ. конф. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2015. С. 52–57.
125. Планктонные вирусы, гетеротрофные бактерии и нанофлагелляты в пресных и морских прибрежных водах бассейна Карского моря (Арктика)

- / А. И. Копылов, Д. Б. Косолапов, Е. Б. Заботкина [и др.] // Биология внутренних вод. 2012. № 3. С. 15–24.
126. *Попова, О. А.* О комплексных индексах при изучении питания рыб / О. А. Попова, Ю. С. Решетников // Вопросы ихтиологии. 2011. Т. 51, № 5. С. 1–6.
127. *Правдин, И. Ф.* Руководство по изучению рыб / И. Ф. Правдин. Москва : Пищ. пром-сть, 1966. 376 с.
128. *Прибыловская, Н. С.* Фитопланктонные сообщества малых водотоков урбанизированных экосистем (на примере реки Лососна, г. Гродно, Беларусь) / Н. С. Прибыловская, Т. П. Марчик, Е. А. Таранова // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 1. С. DOI:10.31862/2500-2961-2020-10-1-63-75.
129. Пространственное распределение тяжелых металлов в почвах как геоэкологическая проблема предприятий теплоэнергетики / О. Л. Захарова, И. Н. Савельева, В. И. Полонский, А. В. Сумина // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6 (141). С. 266–270.
130. *Прыткова, М. Я.* Научные основы и методы восстановления озерных экосистем при разных видах антропогенного воздействия / М. Я. Прыткова. Санкт-Петербург : Наука, 2002. 149 с.
131. Распределение компонентов выбросов алюминиевого производства в атмосфере и атмосферных осадках Байкальского промышленного региона / Н. И. Янченко, А. Н. Баранов, О. Л. Яскина // Известия вузов. Цв. металлургия. 2014. № 3. С. 56–60.
132. Распределение соединений марганца как поллютант аурбанотерриторий на примере городов УР / М. А. Шумилова, О. В. Садиуллина, М. Г. Лебедева, В. Г. Петров // Вестник Удмуртского университета. Серия: Физика и химия. 2013. № 4. С. 33–38.
133. *Романенко, В. И.* Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах / В. И. Романенко. Ленинград : Наука, Ленингр. отд-ние, 1985. 295 с.
134. *Романовская, С. Л.* Изучение влияния ряда природных и антропогенных факторов на химический состав водоисточника и питьевой воды : специальность 02.00.02 : «Аналитическая химия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Романовская Светлана Леонтьевна. Уфа, 2005. 223 с.
135. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
136. *Светлова, М. В.* Эколого-географическое положение Мурманской области: основные аспекты / М. В. Светлова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 21 (116). С. 183–190.
137. *Свистов, П. Ф.* Очерки по кислотности и химическому составу атмосферных осадков (на территории Российской Федерации) / П. Ф. Свистов, А. С. Талаш. Санкт-Петербург : КопиСервис, 2015. 120 с.
138. Сезонная динамика и пространственное распределение физиологических групп микроорганизмов в Байкале / Г. А. Гоман, В. В. Дрюккер, О. В. Федорова,



- В. А. Афанасьев // Структура и функционирование сообществ водных микроорганизмов. Новосибирск : Наука, 1986. С. 101–107.
139. *Селегей, Т. С.* Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири / Т. С. Селегей. Новосибирск : Наука, 2005. 347 с.
  140. *Синькевич, Е. И.* Донные отложения озер восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита / Е. И. Синькевич, И. М. Экман. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 1995. 177 с.
  141. *Скубневская, Г. И.* Загрязнение атмосферы формальдегидом: аналитический обзор / Г. И. Скубневская, Г. Г. Дульцева. Новосибирск : ГПНТБ, 1994. 69 с.
  142. *Слуковский, З. И.* Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде / З. И. Слуковский, С. А. Светов // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 38–45.
  143. *Слуковский, З. И.* Особенности накопления свинца, сурьмы и кадмия в отложениях малых озер юга Карелии / З. И. Слуковский, В. А. Даувальтер // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. 2020. № 4. С. 75–94.
  144. *Слуковский, З. И.* Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды Республики Карелии / З. И. Слуковский, Т. С. Шелехова, Е. В. Сыроежко // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Вып. 1. 2018. Т. 63. С. 103–123. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.106>.
  145. *Слуковский, З. И.* Реконструкция техногенных событий городской среды по данным о содержании редкоземельных элементов в донных отложениях малых озер Карелии и Мурманской области / З. И. Слуковский // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения : тезисы докладов VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В. В. Никонова (Апатиты, 16–22 июня 2019 г.) / редакторы Е. А. Боровичев, О. И. Вандыш. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2019. С. 162–163.
  146. *Смагин, А. В.* Теория и методы оценки физического состояния почв / А. В. Смагин // Почвоведение. 2003. № 3. С. 328–341.
  147. Современное состояние экосистем в районе Кольской АЭС (Мурманская область) / под редакцией В. А. Маслобоева, Е. А. Боровичева, Н. Е. Королевой. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2020. 311 с.
  148. Современные тенденции изменения биоты пресноводных экосистем Мурманской области / Д. Б. Денисов, Н. А. Кашулин, П. М. Терентьев [и др.] // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 3. С. 525–538.
  149. Состав и свойства донных отложений р. Мойки и Обводного канала (Санкт-Петербург) / А. Ю. Опекунов, С. Ф. Мануйлов, В. А. Шахвердов [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География. 2012. № 2. С. 65–80.
  150. Структура и динамика сообществ зообентоса оз. Большая Имандра в зоне влияния медно-никелевого комбината / С. А. Валькова, Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, С. С. Сандимиров // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология. 2012. Т. 10, № 3. С. 22–39.

151. *Субетто, Д. А.* Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции : монография / Д. А. Субетто. Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ имени Герцена, 2009. 339 с.
152. Схема теплоснабжения муниципального образования город Мурманск с 2014 по 2029 г. Санкт-Петербург, 2016. 176 с. URL: [https://www.citymurmansk.ru/strukturnye\\_podri/?itemid=311](https://www.citymurmansk.ru/strukturnye_podri/?itemid=311) (дата обращения: 11.11.2020).
153. *Тарасова, А. А.* Почвы различных функциональных зон города Мурманска / А. А. Тарасова, Е. В. Абакумов // Почвоведение — продовольственной и экологической безопасности страны : тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научной конференции. Белгород, 2016. С. 279–278.
154. *Титов, А. Ф.* Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
155. *Трифонова, И. С.* Экология и сукцессия озерного фитопланктона / И. С. Трифонова. Ленинград : Наука, 1990. 184 с.
156. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) / А. В. Савицкий, А. Ю. Громов, Е. К. Мельников, П. И. Шариков // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 17, № 5. С. 403–416.
157. Урановые аномалии в современных донных отложениях озер северной части Мурманской области, Арктика / З. И. Слуковский, А. В. Гузева, В. А. Даувальтер [и др.] // Геохимия. 2020. Т. 65, № 12. С. 1231–1236. DOI:10.31857/S0016752520100131.
158. *Чугунова, Н. И.* Руководство по изучению возраста и роста рыб / Н. И. Чугунова. Москва : Изд-во АН СССР, 1959. 64 с.
159. *Шахвердов, В. А.* Оценка современного геоэкологического состояния Кольского залива по геохимическим данным / В. А. Шахвердов, М. В. Шахвердова // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4 (24). С. 22–31.
160. *Шелехова, Т. С.* Методы исследования донных отложений озер Карелии / Т. С. Шелехова, З. И. Слуковский, Н. Б. Лаврова. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2020. 111 с.
161. *Шibaева, М. Н.* Видовое разнообразие зообентоса, биоиндикация и экологическое состояние озер Калининградской области / М. Н. Шibaева, Е. П. Матвеева, Е. А. Масюткина // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. Вып. 7. С. 91–96.
162. *Широкова, Л. С.* Пространственно-временная структура бактериопланктона и его роль в самоочищении малых озер Архангельской области : специальность 03.00.16 «Экология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Широкова Людмила Сергеевна. Сыктывкар, 2007. 19 с.
163. *Шустер, Б. И.* Сиг *Coregonus lavaretus pidschian* (Gmelin) Верхнетуломского водохранилища / Б. А. Шустер // Рыбохозяйственные исследования Верхнетуломского и Серебрянского водохранилищ Мурманской области : сборник научных трудов. Мурманск : ПИНРО, 1985. С. 58–71.
164. Экологическая характеристика малых озер в зоне деятельности Мончегорской площадки АО «Кольская ГМК» / Д. Б. Денисов, С. А. Валькова, П. М. Терентьев [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 1–11.

165. Юдович, Я. Э. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. 649 с.
166. Яковлев, В. А. Климат Мурманской области / В. А. Яковлев. Мурманск : Кн. изд-во, 1961. 180 с.
167. Яковлев, В. А. Оценка качества поверхностных вод Кольского Севера по гидробиологическим показателям и данным биотестирования (научно-практические рекомендации) / В. А. Яковлев. Апатиты : КФАН СССР, 1988. 27 с.
168. Яковлев, В. А. Пресноводный зообентос северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика) : в 2 частях. Ч. 2 / В. А. Яковлев. Апатиты : КНЦ РАН, 2005. 145 с.
169. Янин, Е. П. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения / Е. П. Янин, В. Н. Кузьмич, О. М. Иваницкий // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72.
170. Age and formation conditions of Umineralization in the Litsaarea and the Salla-Kuolajarvize (Kola Region, Russia) / T. V. Kaulina, A. A. Kalinin, V. L. Pchenko [et al.] // Minerals. 2018. Vol. 8, No. 12. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/min8120563>.
171. Atlantic RBCA (Risk-Based Corrective Action) for Petroleum Impacted Sites in Atlantic Canada. Version 3. User Guidance. July 2012 (revised January 2015). URL: [https://atlanticrbca.com/wp-content/files\\_mf/1443702097ATLANTIC\\_RBCA\\_User\\_Guidancev3\\_updated\\_September2015.pdf](https://atlanticrbca.com/wp-content/files_mf/1443702097ATLANTIC_RBCA_User_Guidancev3_updated_September2015.pdf).
172. Barinova, S. S. The problem of integral toxic effects assessment on photosynthetic organisms in aquatic ecosystems / S. S. Barinova // Aquatic Bioresources and Habitat. 2018. Vol. 1. P. 39–43.
173. Bazova, M. M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North / M. M. Bazova // Geochem. Int. 2017. Vol. 55. P. 131–143.
174. Belzile, N. Characterization of humic substances extracted from Canadian lake sediments / N. Belzile, H. A. Joly, H. Hongbo // Canadian J. Chemistry. 1997. Vol. 75 (1). P. 14–27.
175. Bioaccumulation and health risk assessment of heavy metals in European eels taken from Lakes Köyceğiz (Turkey) and Võrtsjärv (Estonia) / A. Demirak, F. Keskin, M. Silm [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16822-x>.
176. Biotic control of harmful algal blooms (HABs): A brief review / M. Pal, P. J. Yesankar, A. Dwivedi, A. Qureshi // J. Environmental Management. 2020. Vol. 268. 110687.
177. Bottom sediments of the Arabian Gulf-II. TPH and TOC contents as indicators of oil pollution and implications for the effect and fate of the Kuwait oil slick / M. S. Massoud, F. Al-Abdali, A. N. Al-Ghadban, M. Al-Sarawi // Environmental Pollution. 1996. Vol. 93, No. 3. P. 271–284. <https://doi.org/10.1016/s0269-7491%2896%2900042-5>.
178. Changes in zinc speciation in field soil after contamination with zinc oxide / A. Voegelin, S. Pfister, A. Scheinost [et al.] // Environmental Science and Technology. 2005. Vol. 39 (17). P. 6616–6623. <https://doi.org/10.1021/ES047962G>.

179. Chemical signatures of the Anthropocene in the Clyde estuary, UK: sediment-hosted Pb, 207/206Pb, total petroleum hydrocarbon, polyaromatic hydrocarbon and polychlorinated biphenyl pollution records / C. H. Vane, S. R. Chenery, I. Harrison [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2011. Vol. 369. P. 1085–1111. <http://doi.org/10.1098/rsta.2010.0298>.
180. *David, M. B.* Sulfur constituents and cycling in waters, seston, and sediments of an oligotrophic lake / M. B. David, M. J. Mitchell // *Limnol. Oceanogr.* 1985. Vol. 30. P. 1196–1207.
181. *Davison, W.* Conceptual models for transport at redox boundary / W. Davison // *Chemical processes in lakes* / Ed. W. Stumm. New York : A Wiley Interscience Publication, 1985. P. 31–53.
182. *Denisov, D. B.* Changes in the Hydrochemical Composition and Diatomic Flora of Bottom Sediments in the Zone of Influence of Metal Mining Production (Kola Peninsula) / D. B. Denisov // *Water Resources*. 2007, Vol. 34, No. 6. P. 682–692.
183. Determination of photosynthetic pigments in sea-water / Rep. of SCOP-UNESCO Working Group 17. Paris, UNESCO, 1966. P. 9–18.
184. Eschmeyer's catalog of fishes: genera, species, references / eds R. Fricke, W. N. Eschmeyer, R. Van der Laan. URL: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp> (accessed 07.10.2021).
185. *Faruque, A. M.* Environmental assessment of Dhaka city (Bangladesh) based on trace metal contents in road dusts / A. M. Faruque, B. H. Hawa // *Environmental Geology*. 2007. Vol. 51. P. 975–985. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0367-1>.
186. Fraction of Cu and Ni in the sediments of small lakes of Monchegorsk (Murmansk region, Russia) / Z. I. Slukovskii, V. A. Dauvalter, D. B. Denisov [et al.] // *Science and Education — 2018 : [all-Russian materials. scientific-practical Conf., Murmansk, November 15, 2018]*. Murmansk, 2019. P. 390–396.
187. *Guiry, M. D.* AlgaeBase / M. D. Guiry, G. M. Guiry // World-wide electronic publication. National University of Ireland. Galway, 2022. URL: <http://www.algaebase.org> (accessed 07.10.2021).
188. *Hernandez, H.* Geochemical evidence for the origin of vanadium in an urban environment / H. Hernandez, R. Rodriguez // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2002. Vol. 184, No. 9. P. 5327–5342. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2343-9>.
189. Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea- a new approach for environmental toxicity determination / G. Perin, L. Craboledda, M. Lucchese [et al.] // *Heavy Metal in the Environ.* / Ed. T. D. Lekkas. Edinburg, 1985. Vol. 2. P. 454–456.
190. Heavy Metal Surveys in Nordic Lakes; Concentrations, Geographic Patterns and Relation to Critical Limits / B. L. Skjelkvåle, T. Andersen, E. Fjeld [et al.] // *AMBIO*. 2001. Vol. 30, No. 1. P. 2–10. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.1.2>.
191. Historical trends in persistent organic pollutants and metals recorded in sediment from Lake Ellasjøen, Bjørnøya, Norwegian Arctic / A. Evensen, G. N. Christensen, J. Carroll [et al.] // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 146, Iss. 1. P. 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.04.038>.

192. Intercomparison — 2016 1630: pH, Conductivity, Alkalinity, NO<sub>3</sub>-N, Cl, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn // ICP Waters report 129/2016 / Norwegian Institute for Water Research. Oslo, 2016. Report No. 7081. 72 p.
193. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel / H. Agrawal, Q. G. Malloy, W. A. Welch [et al.] // Atmospheric Environment. 2008. Vol. 42, No. 21. P. 5504–5510. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.053>.
194. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA / J. Escobar, T. J. Whitmore, G. D. Kamenov, M. A. Rieding-er-Whitmore // J. Paleolimnology. 2013. Vol. 49(2). P. 237–252. <https://doi.org/10.1007/s10933-012-9671-9>.
195. *Jarvis, K. E.* Inductively coupled plasma mass spectrometry: a new technique for the rapid or ultra-trace level determination of the rare-earth elements in geological materials / K. E. Jarvis // Chem. Geol. 1988. Vol. 68. P. 31–39. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90084-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90084-8).
196. *Ladonin, D. V.* Fractional composition of nickel, copper, zinc, and lead compounds in soils polluted by oxides and soluble metal salts / D. V. Ladonin, M. M. Karpukhin // Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 44 (874). <https://doi.org/10.1134/S1064229311040053>.
197. *López, D. L.* Geochemical Mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio / D. L. López, E. Gierlowski-Kordesch, C. Hollenkamp // Water, Air, & Soil Pollution. 2010. Vol. 21. P. 27–45. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0364-6>.
198. *Merritt, R. W.* An introduction the aquatic insects of North America / R. W. Merritt, K. W. Cummins. Second Edition. 1984. 722 p.
199. Metal fractionation in sediments of the Sergipe River, northeast, Brazil / E. A. Passos, J. P. Alves, C. A. Garcia, A. S. Costa // J. Brazilian Chemical Society. 2011. Vol. 22 (5). P. 811–1004. <https://doi.org/10.1590/s0103-50532011000500004>.
200. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia / D. Gregurek, E. Melcher, V. A. Pavlov [et al.] // Mineralogy and Petrology. 1999. Vol. 65. P. 87–111.
201. *Mortimer, C. H.* The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes / C. H. Mortimer // J. Ecol. 1942. Vol. 30. P. 147–201.
202. Occurrence forms of metals in natural waters depending on water chemistry / T. I. Moiseenko, M. I. Dinu, N. A. Gashkina, T. A. Kremleva // Water Resources. 2013. Vol. 40, No. 4. P. 407–416. <https://doi.org/10.1134/S009780781304009X>.
203. *Oros, D. R.* The extent and significance of petroleum hydrocarbon contamination in Crater Lake, Oregon / D. R. Oros, R. W. Collier, B. R. T. Simoneit // Hydrobiologia. 2007. Vol. 574. P. 85–105. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0347-1>.
204. *Pacyna, J. M.* An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide / J. M. Pacyna, E. G. Pacyna // Environmental Reviews. 2001. Vol. 4. P. 269–298. <https://doi.org/10.1139/er-9-4-269>.

205. *Pantle, R.* Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. Gas- und Wasserfach / R. Pantle, H. Buck. 1955. 604 p.
206. *Peltier, R. E.* Residual oil combustion: 2. Distributions of airborne nickel and vanadium within New York City / R. E. Peltier, M. Lippmann // *J. Exposure Sci. and Environmental Epidemiology*. 2010. Vol. 20. P. 342–350. <https://doi.org/10.1038/jes.2009.28>.
207. Rare earth elements in street dust and associated health risk in a municipal industrial base of Central China / G. Sun, Z. Li, T. Liu [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. 2017. Vol. 39 (6). P. 1469–1486. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9982-x>.
208. Remediation of vanadium-contaminated soils by the combination of natural clay mineral and humic acid / Y. Dong, H. Lin, Y. Zhao, E. Menzembere // *J. Cleaner Production*. 2021. 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123874>.
209. Recent sediments of Arctic small lakes (Russia): geochemistry features and age / Z. Slukovskii, M. Medvedev, A. Mitsukov [et al.] // *Environmental Earth Sci*. 2021. Vol. 80 (8). P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09609-3>.
210. Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles Wade / H. M. Hwang, M. J. Fiala, D. Park, T. L. Wade // *International J. Urban Sciences*. 2016. Vol. 20, No. 3. P. 334–360. <https://doi.org/10.1080/12265934.2016.1193041>.
211. *Rheinheimer, G.* Aquatic Microbiology / G. Rheinheimer. 4<sup>th</sup> ed. London : Wiley, 1992. 363 p.
212. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index / D. L. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris, D. W. Jeffrey // *Helgoländer Meeresunters*. 1980. Vol. 33. P. 566–575.
213. *Ruttner-Kolisko, A.* Suggestion for biomass calculation of planktonic rotifers / A. Ruttner-Kolisko // *Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol*. 1977. Bd. 8. P. 71–78.
214. *Quina, M. J.* Air Pollution Control in Municipal Solid Waste Incinerators / M. J. Quina, J. C. M. Bordado, R. M. Quinta-Ferreira // *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*. 2011. P. 332–358. <https://doi.org/10.5772/17650>.
215. *Shannon, R. D.* Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R. D. Shannon // *Acta Crystallogr*. 1976. Vol. A32. P. 751–767.
216. *Siver, P. A.* Diatoms of North America: The Freshwater Flora of Waterbodies on the Atlantic Coastal Plain / P. A. Siver, P. B. Hamilton // *Iconographia Diatomologica*. 2011. 22.
217. *Sladeček, V.* System of water quality from the biological point of view / V. Sladeček // *Arch. Hydrobiol., Beiheft., Ergebnisse der Limnol*. 1973. Bd. 7. S. 1–218.
218. Small Lakes Ecosystems under the Impact of Non-Ferrous Metallurgy (Russia, Murmansk region) / D. Denisov, P. Terentjev, S. Valkova, L. Kudryavtzeva // *Environments*. 2020. Vol. 7 (4), No. 29. P. 1–13.
219. Soil/Sediment target and intervention values for Mineral oil (or TPH) // *Environmental Guidelines and Standards for the Petroleum Industry in Nigeria (EGASPIN)*. Department of Petroleum Resources (DPR). Lagos, Nigeria, 2002. Vol. 2 (1). P. 415. URL: <https://ngfcp.dpr.gov.ng/media/1066/dprs-egaspin-2002-revised-edition.pdf>.

220. The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia / Z. Slukovskii, V. Dauvalter, A. Guzeva [et al.] // *Water*. 2020. Vol. 12. P. 1130. <https://doi.org/10.3390/w12041130>.
221. Trace element fractions in sediments of urbanised lakes of the arctic zone of Russia / A. Guzeva, Z. Slukovskii, V. Dauvalter, D. Denisov // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193 (378). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09166-z>.
222. Standard method for examination for water and wastewater / eds L. S. Clescerl, A. E. Greenberg, A. D. Eaton ; American Public Health Association USA. 20<sup>th</sup> Ed. Washington, 1999.
223. *Suffet, I. H.* Aquatic Humic Substances, Influence on Fate and Treatment of Pollutants / I. H. Suffet, P. MacCarthy // American Chemical Society, Advances in Chemistry Series. Washington, D.C., 1989. 864 p.
224. Temporal Trends and Spatial Variation Characteristics of Hazardous Air Pollutant Emission Inventory from Municipal Solid Waste Incineration in China / H. Tian, J. Gao, L. Lu [et al.] // *Environmental Sci. & Technol.* 2012. 120904130152009. <https://doi.org/10.1021/es302343s>.
225. The sources and distribution of vanadium in the atmosphere / W. H. Zoller, G. E. Gordon, E. S. Gladney, A. G. Jones // *Trace Elements in the Environment / American Chemical Society*. Washington, DC., 1973. Ch. 3. P. 31–47. <https://doi.org/doi:10.1021/ba-1973-0123.ch003>.
226. *Thomas V. M.* The elimination of lead in gasoline / V. M. Thomas // *Annual Review of Energy and the Environment*. 1995. Vol. 20. P. 301–324.
227. *Tikkanen T.* Kasviplanctonopas. Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy / T. Tikkanen. Helsinki, 1986. 279 p.
228. *Turner, A.* Trace metal contamination in sediments from UK estuaries: an empirical evaluation of the role of hydrous iron and manganese oxides / A. Turner // *Estuarine, Coastal and Shelf Scie.* 2000. Vol. 50 (3). P. 355–371.
229. *Ulfstrand, S.* Benthic animal communities in Lapland stream / S. Ulfstrand. *Oikos*, 1968. Vol. 10. P. 1–20.
230. Vanadium and nickel in dustfall as indicators of power plant pollution / E. Ganor, S. Altshuler, H. A. Foner [et al.] // *Water, Air, and Soil Pollution*. 1988. Vol. 42, No. 3–4. P. 241–252.
231. Variations and Origins of Aliphatic Hydrocarbons in Sediment Cores from Chini Lake in Peninsular Malaysia / A. R. Bakhtiari, M. P. Zakaria, M. I. Yaziz [et al.] // *Environmental Forensics*. 2011. 12:1. P. 79–91. <https://doi.org/10.1080/15275922.2011.547439>.
232. *Wang, J.* Source apportionment of sediment-associated aliphatic hydrocarbon in a eutrophicated shallow lake, China / J. Wang, Z. Yang, T. Chen // *Environmental Sci. and Pollution Research*. 2012. Vol. 19. P. 4006–4015. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0988-8>.



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

