

На правах рукописи



Долгих Павел Геннадьевич

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
УСТЬ-ИЛИМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

Специальность: 1.6.21 – Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск, 2024 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН), г. Иркутск

Научный руководитель: **Пастухов Михаил Владимирович**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической геохимии и эволюции геосистем ИГХ СО РАН, г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Мазухина Светлана Ивановна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты

Онищук Наталья Анатольевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лимнологического института СО РАН, Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Чита

Защита состоится 19 июня 2024 г в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науке Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а
e-mail: amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, адрес сайта:
<http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.х.н.



Амосова А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Влияние техногенеза неизбежно приводит к негативным преобразованиям водных экосистем и влечет за собой ухудшение качества поверхностных вод. Помимо снижения мировых запасов пресных питьевых ресурсов, возникают серьезные угрозы для жизнедеятельности гидробионтов. Одним из наиболее показательных примеров антропогенной трансформации водных экосистем является зарегулирование рек, при котором коренным образом изменяются их гидрологические, гидрохимические, биологические и др. параметры. Эти негативные преобразования усугубляет поступление загрязняющих веществ от предприятий различных отраслей промышленности, расположенных на побережье созданных водохранилищ.

Усть-Илимское водохранилище – третье водохранилище в каскаде Ангарских ГЭС уже в начальный период своего существования было отнесено к водоемам с высокой степенью антропогенной нагрузки (Стрижева, 1985), в связи с поступлением в него загрязняющих веществ от крупной промышленной зоны г. Братск, включающей предприятия химической, металлургической, лесоперерабатывающей и других видов промышленности. Со сточными водами предприятий этой зоны в небольшой приток Усть-Илимского водохранилища – р. Вихорева более 70 лет поступают огромные количества органических и неорганических веществ. Первые исследования, определившие значительное загрязнение вод реки и ее влияние на гидрохимический состав р. Ангары на протяжении около 200 км, были проведены еще в 60-х годах прошлого столетия (Стрижева, 1985). Следующие работы, направленные на изучение основного ионного состава, биогенных компонентов и газового режима вод, проведены в период становления Усть-Илимского водохранилища (Стрижева, 1985; Воробьева и др., 1986). Несмотря на возрастающую интенсивность деятельности предприятий промышленной зоны г. Братск, о количественных характеристиках и поведении элементов в воде и донных осадках сформировавшегося водохранилища сведений крайне мало. Исследования современного периода акцентированы на определение концентраций загрязняющих веществ, специфичных для промышленной зоны г. Братск (сульфидов, сероводорода, взвешенных и биогенных веществ, сульфат-ионов, ионов хлора и натрия), в воде р. Вихорева и Усть-Вихоревском заливе Усть-Илимского водохранилища (Варданын, Яблокова, 2014; Игнатенко, 2014). Однако, известно, что помимо специфичных для каждого вида промышленности загрязняющих веществ, в окружающую среду потенциально может поступать большой спектр и других органических и неорганических соединений. Так, например, среди опасных веществ приоритетное место занимают потенциально токсичные микроэлементы, обладающие высокой биодоступностью (Eqani et al., 2016; Моисеенко, 2019). По концентрации микроэлементов в воде Усть-Илимского водохранилища опубликованы только средние данные для всего водоема (Карнаухова, 2008). Данные по концентрации

элементов в донных отложениях в литературе отсутствуют. В связи с этим, исследования, сосредоточенные на сборе информации о количественных и качественных характеристиках, их пространственно-временных изменениях в воде и донных отложениях Усть-Илимского водохранилища являются чрезвычайно актуальной геоэкологической задачей, решение которой направлено на рациональное использование и сохранение водных ресурсов.

Цель исследования: выявить основные факторы, определяющие химический состав вод и донных отложений Усть-Илимского водохранилища на участках в разной степени подверженных антропогенной нагрузке.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи:**

1. Изучить концентрации главных ионов, биогенных компонентов и микроэлементов в воде р. Вихорева, которая является приемником сточных вод промышленной зоны г. Братск, и Усть-Вихоревском заливе Усть-Илимского водохранилища. Выделить элементы, которые являются показателями антропогенной эмиссии и определяют трансформацию состава вод р. Вихорева и Усть-Илимского водохранилища.

2. По результатам мониторинговых исследований гидрохимического состава изучить пространственно-временное распределение главных ионов, биогенных компонентов и микроэлементов в воде русловой части Усть-Илимского водохранилища. Установить особенности и закономерности накопления элементов в воде водохранилища, выделить природные и антропогенные факторы формирования гидрохимического состава.

3. Изучить химический состав донных отложений Усть-Илимского водохранилища. Провести зонирование акватории Усть-Илимского водохранилища по особенностям накопления элементов в донных отложениях и степени антропогенного воздействия. Для определения мобильности потенциально опасных микроэлементов определить формы их нахождения в донных отложениях.

Защищаемые положения

1. К приоритетным загрязнителям, поступающим со сточными водами промышленной зоны г. Братск в р. Вихорева и далее в Усть-Илимское водохранилище отнесены SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , NH_4^+ , Cr, Mn, Co, Pb. Повышенные концентрации HCO_3^- , SO_4^{2-} , Al, Fe, As и Hg в воде р. Вихорева имеют природный и техногенный генезис.

2. По акватории Усть-Илимского водохранилища выделяются участки с повышенными, относительно характерных для водоема, концентрациями главных ионов, биогенных компонентов и микроэлементов – Усть-Вихоревский залив и нижняя часть водохранилища. В межгодовом аспекте наблюдается тенденция снижения концентраций Al, As, Cd, Pb и Hg в воде Усть-Илимского водохранилища.

3. Распределение элементов в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища показывает, что Усть-Вихоревский залив является участком

значительного загрязнения. К наиболее подвижным в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища относятся Mn и Cd, закрепленным – Al и Pb. Доля мобильных и потенциально мобильных форм элементов возрастает в донных отложениях зоны максимального воздействия техногенеза, что указывает на высокую вероятность вторичного загрязнения водной среды.

Научная новизна. На основе мониторинговых исследований сформирован значительный массив данных по концентрации главных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и биогенных компонентов (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}) в водах Усть-Илимского водохранилища. Дана характеристика микроэлементного состава (Al, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg) вод р. Вихорева и Усть-Илимского водохранилища. Результаты исследований позволили оценить пространственно-временную динамику гидрохимического состава, выделить природные и антропогенные источники поступления, определить миграционные характеристики элементов. Выявлено, что микроэлементы антропогенного происхождения поступают в Усть-Илимское водохранилище, в основном, со сточными водами, сбрасываемыми предприятиями промышленной зоны г. Братск в р. Вихорева. Привнос элементов природного генезиса, связан, в первую очередь, с поступлением грунтовых вод в ложе водохранилища. Показано, что техногенное поступление имеет более протяженные потоки рассеяния элементов, чем природное. Впервые для Усть-Илимского водохранилища определен химический состав донных отложений. Изучены формы нахождения потенциально токсичных элементов в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища. Показано, что нахождение элементов в подвижных и потенциально подвижных формах в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища определяет их роль как вторичного источника загрязнения водной среды.

Практическая значимость. Полученные на основе многолетних исследований данные по накоплению, распределению, мобильности и источникам поступления элементов в воде и донных отложениях Усть-Илимского водохранилища послужат основой для планирования мониторинговых работ, крайне необходимых в период индустриального развития. Результаты работы будут актуальны для водопользователей и государственных органов власти при планировании эффективных мер по минимизации негативных экологических преобразований, вызванных прошлой и настоящей хозяйственной деятельностью, а значит и сохранению уникальной пресноводной Байкало-Ангарской системы, неразрывной частью которой является Усть-Илимское водохранилище.

Материал и методы исследований. Исходными данными для решения поставленных задач стали результаты комплексных экспедиций, проведенных по акватории Усть-Илимского водохранилища в 2004, 2005, 2014 и 2017 гг. Общий объем отобранного и проанализированного материала составил 904 пробы поверхностной и придонной воды и 158 проб донных отложений. Аналитические

работы проведены в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Обработка полученной информации по химическому составу вод и донных отложений проведена с использованием следующих методических подходов: литературный обзор по теме исследования, сравнительный анализ данных, пространственно-временной анализ данных, анализ сопряженных сред, оценка количественных показателей уровня загрязнения, обобщение.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в отборе проб воды и донных отложений Усть-Илимского водохранилища в 2014 и 2017 гг., в подготовке проб для химического анализа, определении форм нахождения тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях, обработке и интерпретации результатов химического анализа, формулировке целей и задач исследования, обобщении полученных данных, подготовке иллюстративных материалов, представлении полученных результатов на научных мероприятиях и подготовке публикаций.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования обеспечена большим объемом фактического материала, использованием комплекса современных аналитических методов для определения состава природных сред и получением согласованных результатов при анализе стандартных образцов. Корректность результатов статистической обработки данных гарантирована применением современных программных продуктов. По материалам исследования сделаны устные доклады на IX Сибирской конференции молодых учёных по наукам о земле (г. Новосибирск, 2018 г.); VII Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (г. Пермь, 2019 г.); V Всероссийской молодежной научной конференции по геологии и геофизике (г. Улан-Удэ, 2019 г.); Всероссийской конференции молодых учёных «Современные направления развития геохимии» (г. Иркутск, 2018 г., 2022 г. и 2023 г.); V Международной научной конференции «Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Вост. Азии» (г. Иркутск, 2022 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях рецензируемых журналах из перечня ВАК, 2 статьях WoS/Scopus, 8 тезисах и материалах научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 201 наименования и приложения. Материал работы изложен на 152 страницах, включая 18 таблиц и 22 рисунка.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность за организацию экспедиционных исследований, предоставление материала, обсуждение работы и всестороннюю поддержку научному руководителю к.б.н. Пастухову М.В. и к.г.-м.н. Полетаевой В.И. За критические замечания и рекомендации автор благодарен д.т.н. Васильевой И.Е. Неоценимую помощь в выполнении аналитических работ оказали

к.ф.-м.н. Смирнова Е.В., к.г.-м.н. Зарубина О.В., Пахомова Н.Н., к.х.н. Пройдакова О.А., Судакова Н.Д., Чернигова С.Е., Тарасюк Н.А., Андрулайтис Л.Д., Рязанцева О.С., к.х.н. Айсуева Т.С. в проведении химического фракционирования донных отложений – Старченко И.В.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Геоэкологические проблемы водохранилищ

В главе представлен литературный обзор по состоянию изученности одной из важнейших геоэкологических проблем, связанной с воздействием антропогенной нагрузки на водные системы, и, как следствие, ухудшением качественных характеристик их вод и донных отложений. Основным объектом исследования является Усть-Илимское водохранилище, которое относится к созданным человеком природно-антропогенным водоемам. В связи с этим, проанализированы основные экологические последствия, возникающие после зарегулирования рек (изменение ландшафтов, режима уровня и стока подземных вод, физико-химических параметров вод и донных отложений, прекращение транспорта взвешенных веществ и т.д.) и оказывающие влияние на последующее функционирование водоема. Значительное внимание уделено антропогенной эмиссии в водные системы микроэлементов, которые занимают приоритетное место среди загрязняющих веществ из-за своей токсичности. Показано, что дальнейшая судьба поступивших в водоем потенциально токсичных элементов имеет свои эколого-геохимические особенности: миграция и распространение в водной среде, накопление в донных отложениях и, самое опасное, биоаккумуляция в гидробионтах и передача по трофической цепи.

Анализ проведенных ранее работ по изучению химического состава абиотических компонентов Ангарского каскада ГЭС позволил сделать вывод, что исследований по Усть-Илимскому водохранилищу недостаточно для определения современной антропогенной нагрузки на водоем. Вышесказанное позволило обосновать цель и задачи настоящего исследования.

Глава 2. Объект и методы исследования

Приведен обзор физико-географических условий формирования Усть-Илимского водохранилища. Рассмотрены основные характеристики климата, рельефа, геологического строения, стратиграфии и тектоники территории, входящей в сферу влияния района исследования. Представлены основные гидрологические параметры Усть-Илимского водохранилища.

Дана характеристика основных промышленных объектов Братской промышленной зоны, расположенной в бассейне водохранилища и оказывающей непосредственное влияние на его эколого-геохимическое состояние.

Приводится описание материалов и методов исследования, использованных при выполнении работы. В связи с различием гидрологических параметров и степени

антропогенной нагрузки в пределах русловой части Усть-Илимского водохранилища выделено пять участков: I участок – от плотины Братской ГЭС до пос. Дубынино (40 км), II участок – от пос. Дубынино до пос. Седаново (60 км), III участок – от пос. Седаново до устья Илимской части (155 км), IV участок – от устья Илимской части до плотины Усть-Илимской ГЭС (35 км) и V участок – Илимская часть (рис. 1).

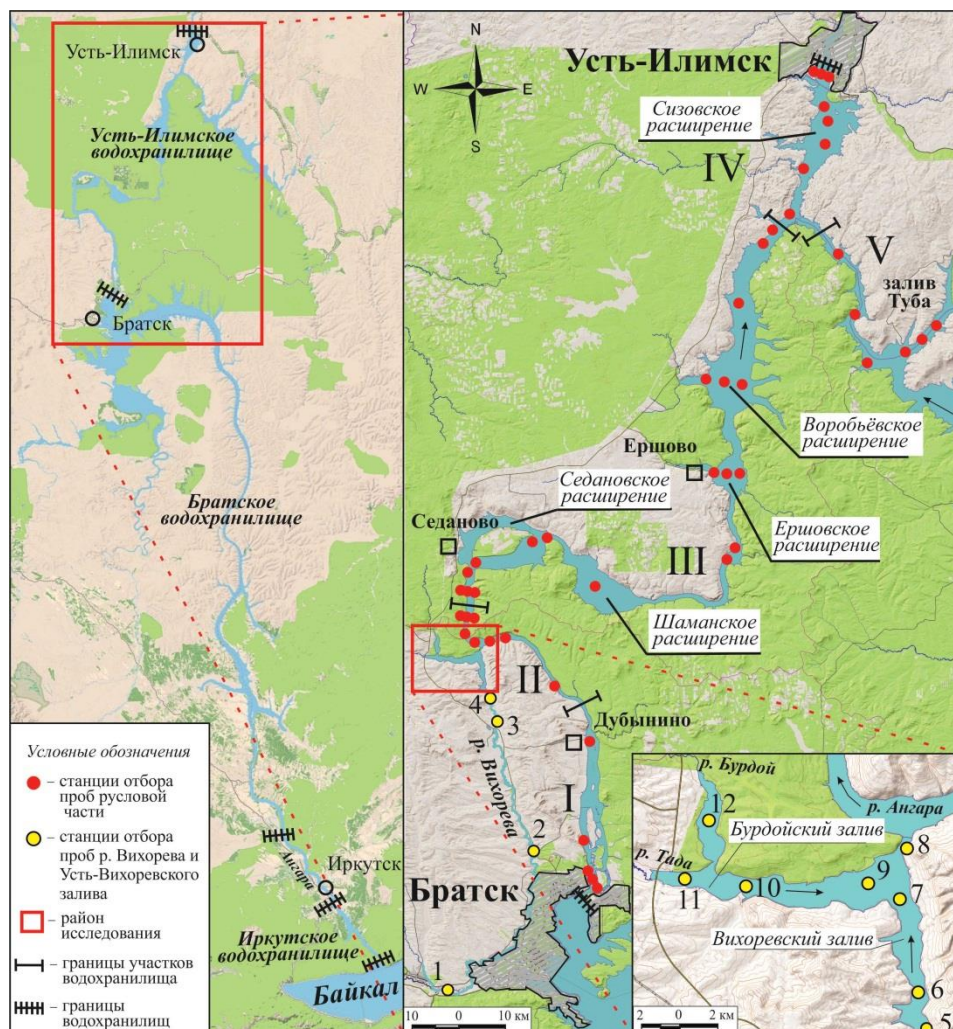


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб в русловой части Усть-Илимского водохранилища, Усть-Вихоревском заливе и р. Вихорева. I – V – участки водохранилища

Как наиболее техногенно-нагруженный участок отдельно рассмотрен Усть-Вихоревский залив, состоящий из двух частей (Вихоревской и Бурдойской). Материалом для проведения исследований по теме диссертационной работы послужили пробы поверхностной и придонной воды, отобранные в 2004 г. (328 проб), в 2005 г. (256 проб), в 2014 г. (112 проб), в 2017 г. (208 проб), а также 158 проб донных отложений по всей акватории Усть-Илимского водохранилища. Аналитические работы выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Определение концентраций As, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn, Al, Pb, Cr, Co и Ni в воде и донных отложениях

выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре ELEMENT-2, Hg – на атомно-абсорбционном анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91 методом «холодного пара». Измерение концентраций HCO_3^- выполнено титриметрическим методом, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методом, Cl^- меркуриметрическим методом, Ca^{2+} и Mg^{2+} – методом атомно-абсорбционной спектрометрии, Na^+ и K^+ – методом эмиссионной спектрометрии, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} – фотометрическим методом, растворенный кислород – йодометрическим методом. Для определения концентраций органического углерода (Cорг) рассчитано химическое потребление кислорода титриметрическим методом с последующим перерасчетом по эквивалентному отношению углерода к кислороду.

Определение породообразующих элементов в донных отложениях выполнено методом рентгенофлуоресцентного анализа на сканирующем спектрометре S4 Pioneer (Bruker AXS). Для изучения форм нахождения элементов в донных осадах использовали метод (Кузнецов, Шимко, 1990), который является модификацией методики, предложенной (Tessier et al., 1979), для Hg – методика (Bloom et al., 2003). Химический анализ концентраций элементов в вытяжках из донных осадков осуществлен методом атомной абсорбции на спектрометрах Perkin-Elmer-503 и «РА-915+».

Глава 3. Природные и антропогенные источники, влияющие на гидрохимический состав Усть-Илимского водохранилища

Река Вихорева, как основной источник поступления элементов антропогенного происхождения. Работами прошлых лет (Стрижева, 1985) определено, что до создания Усть-Илимского водохранилища коричневые воды высокозагрязненной реки, характеризующиеся низкой прозрачностью, специфическим запахом, высокой цветностью и различными плавающими примесями, при впадении резко контрастировали с голубовато-зелеными водами р. Ангары. В период настоящих исследований специфический запах, высокая цветность и пена отмечена на участках реки, приближенных к сбросам сточных вод. В районе впадения р. Вихорева в Усть-Вихоревский залив характерные органолептические показатели загрязненных вод выражены в малой цветности воды, прозрачность воды 0,9 м.

Результаты исследования показали, что несмотря на анонсируемое в средствах массовой информации снижение техногенной нагрузки от предприятий промышленной зоны г. Братск, загрязнение р. Вихорева продолжается. В воде реки после поступления сточных вод увеличиваются концентрации главных ионов, в основном SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , биогенных компонентов – NH_4^+ , PO_4^- , органического углерода, микроэлементов (рис. 2) – Cr, Mn, Co, Pb. Техногенное происхождение микроэлементов в воде р. Вихорева подтверждают коэффициенты корреляции с главными для предприятий деревоперерабатывающей промышленности

загрязнителями. В большей степени, это корреляционные зависимости между Cl^- , Na^+ и Mn ($r = 0,99$ и $r = 0,97$, $p < 0,01$), Cl^- , Na^+ и Cr ($r = 0,98$, $r = 0,94$, $p < 0,01$), Cl^- , Na^+ и Pb ($r = 0,93$ и $r = 0,90$, $p < 0,01$).

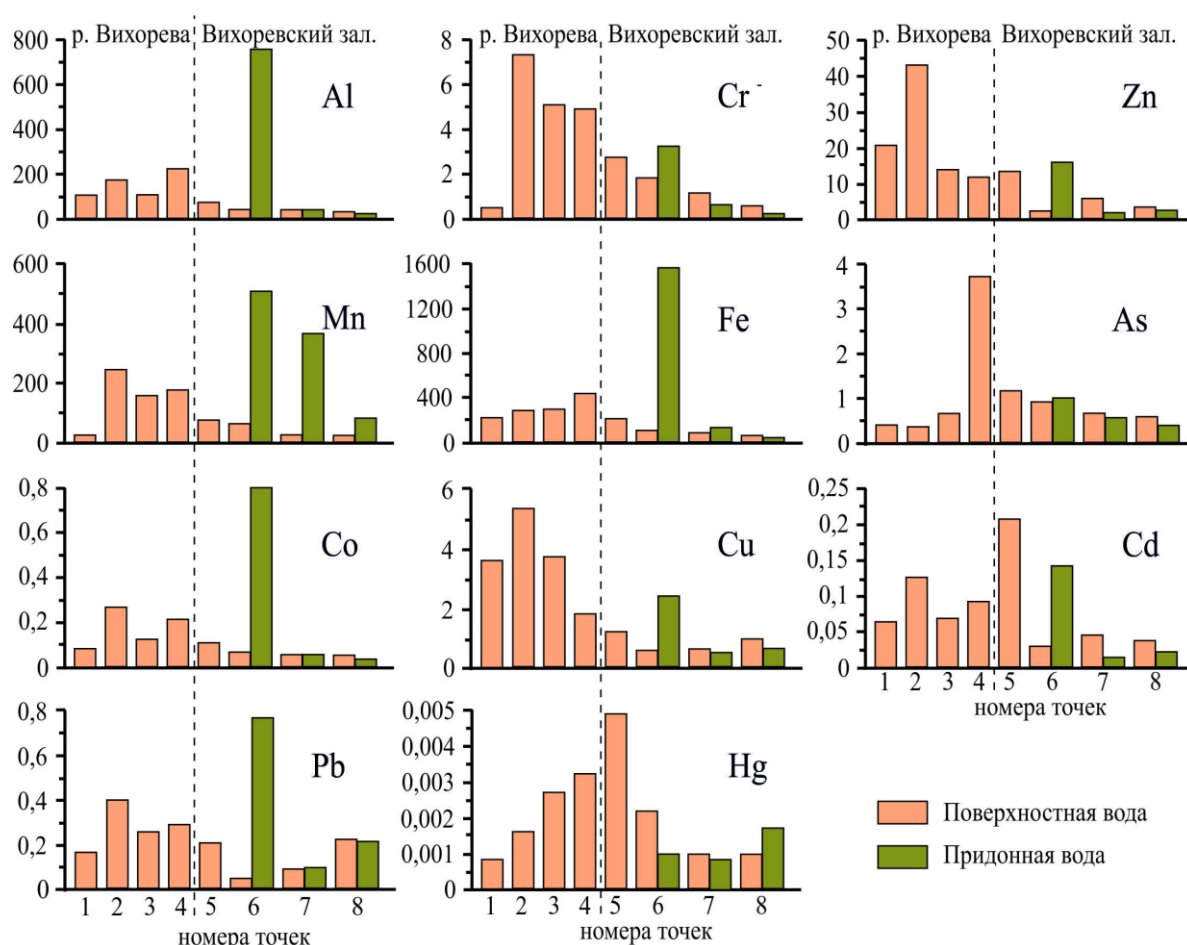


Рис. 2. Концентрации микроэлементов (мкг/л) в водах р. Вихорева и Вихоревского залива 1 – фоновая точка р. Вихорева (выше г. Братск), 2 – после поступления сточных вод промзоны г. Братск, 3 – 14 км выше устья р. Вихорева, 4 – устье р. Вихорева: 5 – впадение р. Вихорева в залив, 6 – 2 км ниже устья р. Вихорева, 7 – перед слиянием Вихоревского и Бурдойского заливов, 8 – устье Усть-Вихоревского залива. Нумерация точек соответствует рис. 1

После поступления сточных вод резко снижается концентрация O_2 , дефицит которого наблюдается на всем протяжении реки. Наиболее ярко это проявляется перед устьем реки, где концентрация кислорода в воде падает до критических значений – 0,3 мг/л. Несомненно, что такой кислородный режим определяет стрессовые условия для гидробионтов: факты гибели рыб в р. Вихорева нередко появляются в открытой печати. Присутствие в сточных водах органических веществ, специфичных для сульфатцеллюлозного деревообрабатывающего производств, определяется значительным увеличением концентрации Сорг в воде р. Вихорева после их впадения. Ниже по течению, вплоть до самого устья реки, концентрация Сорг остается повышенной.

Изучение распределение главных ионов и микроэлементов по длине р. Вихорева выделило еще одну особенность формирования ее гидрохимического состава. После поступления сточных вод в водной среде реки происходит последовательное снижение концентраций только Cl^- , Cr , Zn , Cu (рис. 2). Концентрации Fe , Hg и As , напротив, увеличиваются. Распределение HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Al , Mn , Cd , Pb в воде реки неравномерно. Факторный анализ выделил для вод р. Вихорева ассоциацию элементов, объединенную Фактором 1, в пределах которого можно выделить две группы (рис. 3А).

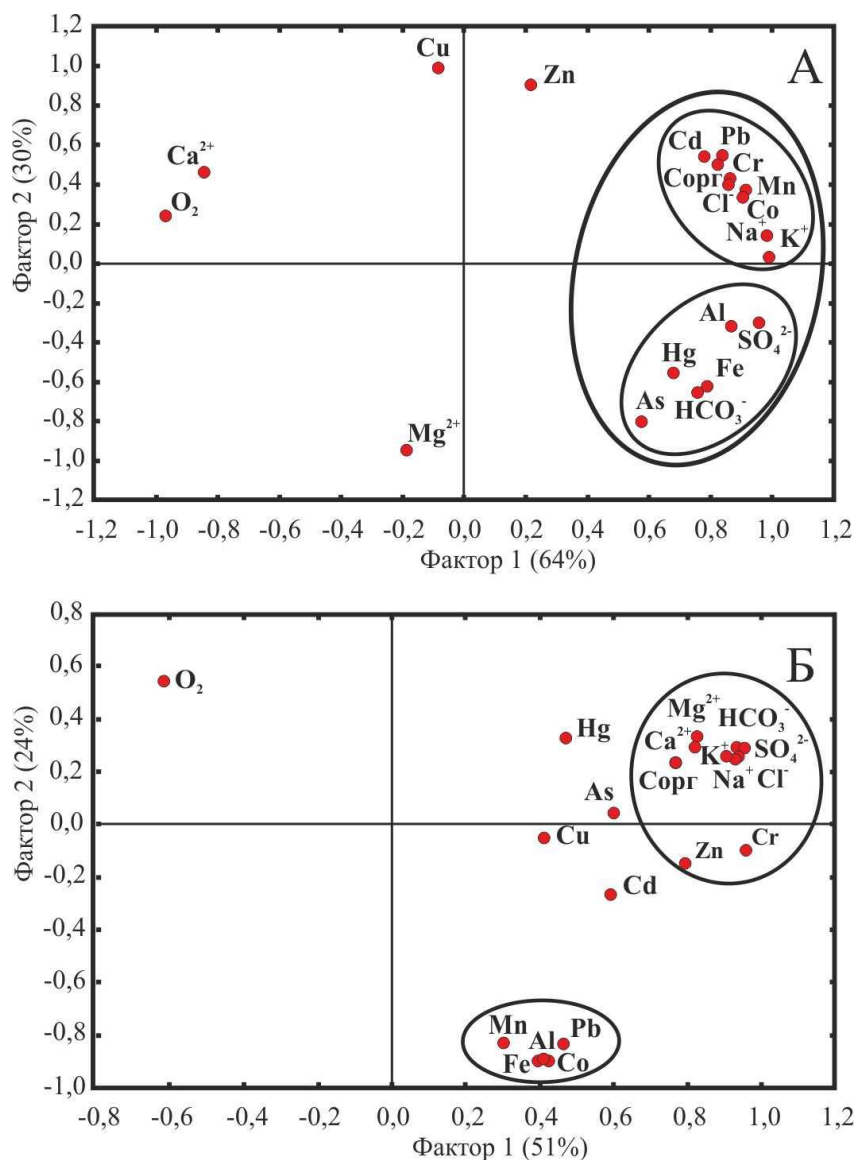


Рис. 3. Факторный анализ концентраций главных ионов, микроэлементов, растворенного кислорода и Сорг в водах р. Вихорева (А) и Усть-Вихоревского залива (Б).

В первую группу включены Cl^- , Na^+ , K^+ , Cr , Mn , Co , Pb , Cd и Сорг – элементы, которые имеют, в большей степени, техногенное происхождение. Во вторую группу – HCO_3^- , SO_4^{2-} , Al , Fe , As , Hg . Повышение концентраций этих элементов по течению р. Вихорева, в точках наблюдения, удаленных от зоны поступления сточных вод,

отражают фильтрацию сульфатно-гидрокарбонатных подземных вод в днище долины реки (Шенькман, 1975) и выщелачивание гипсов, распространенных в ее бассейне (Стрижева, 1985). Микроэлементный состав подземных вод, разгружающихся в долину р. Вихорева, не изучен. Поэтому коэффициенты корреляции As ($r = 0,94, p < 0,01$), Hg ($r = 0,95, p < 0,01$), Fe ($r = 0,99, p < 0,01$) с HCO_3^- , который не относится к основным загрязняющим веществам промышленной зоны г. Братск, но является основным компонентом подземных вод и выделение группы элементов в пределах Фактора 1, определяют природные источники поступления микроэлементов.

Распределение главных ионов и микроэлементов по акватории Усть-Вихоревского залива неоднородно. Во всех точках наблюдения Вихоревской части залива, за исключением придонной воды его устья, концентрации главных ионов в воде выше, чем в русловой части Усть-Илимского водохранилища. По акватории залива наблюдается преобладание концентраций анионов и катионов в поверхностном слое над придонным. Подобное явление, отмеченное и в предыдущих исследованиях (Стрижева, 1985), связано с растеканием более теплых, подогретых сточными водами вод р. Вихорева, по поверхности холодных вод р. Ангары. Основной ионный состав Бурдойского залива формируется с участием поступающих в него рек Тада и Бурдой. Ближе к устьевым участкам рек концентрации SO_4^{2-} , Cl^- и Na^+ ниже, чем на участке слияния Вихоревского и Бурдойского заливов. Также как в Вихоревском заливе, концентрации катионов и анионов в поверхностной воде повышены, по сравнению, с придонной. Выделенные особенности пространственного распределения главных ионов показывают, что обмен вод между смежными частями Усть-Вихоревского залива, определяющийся гидродинамическими параметрами водоема, способствует распространению загрязненных вод р. Вихорева в Бурдойский залив.

В воде Вихоревского залива концентрации O_2 подвержены значительным вариациям (от 0,6 мг/л до 10,1 мг/л). Несмотря на увеличение его концентраций в поверхностных слоях воды до нормативных для водоемов рыбохозяйственного назначения (выше 6 мг O_2 /л), в придонных слоях залива фиксируются критические значения. Концентрации Сорг в воде Вихоревского залива (5,6-27,4 мг/л) снижаются, по сравнению с водой р. Вихорева (48,7-131,9 мг/л). Как поверхностные, так и придонные воды Бурдойского залива содержат концентрации кислорода, достаточные для удовлетворительного обитания гидробионтов, и невысокие показатели органического вещества (9,1-10,6 мг/л).

Концентрации Al, Cr, Mn, Fe, Cu, As, Pb в воде Усть-Вихоревского залива уменьшаются, по сравнению с р. Вихорева (рис. 2). Основным фактором самоочищения на этом участке является разбавление загрязненных вод реки водами, формирующимися с участием вод русловой части водохранилища. Характерной особенностью для Al, Mn, Co, Pb, Cr, Fe, Cu и Zn является приуроченность их

максимальных концентраций к придонным водам залива в 2 км ниже устья р. Вихорева (рис. 2). Выделяются концентрации Mn, которые в придонных слоях (81,4-511,5 мкг/л) воды значительно выше, чем в поверхностных (16,2-76,2 мкг/л). Известно, что Mn при высоких положительных значениях Eh водной среды легко окисляется, переходит в нерастворимую форму и переносится в составе взвеси (Pokrovsky et al., 2006). Миграция Mn может происходить с большим количеством взвешенных веществ, содержащихся в воде р. Вихорева. На участке смешения р. Вихорева и Вихоревского залива при резком замедлении скорости течения, поступающая с водой реки взвесь, содержащая гидроксиды Mn, Fe, Al и др. микроэлементов, начинает оседать, приводя к увеличению их концентраций в донных отложениях.

В Усть-Вихоревском заливе взаимосвязи между изучаемыми компонентами определены 2 факторами (рис. 3Б). Фактор 1 объединяет между собой главные ионы, а также Cr, Zn и Сорг, Фактор 2 – Mn, Fe, Al, Pb, Co. Фактором 1 объединена ассоциация компонентов, уменьшение которых в воде Усть-Вихоревского залива обусловлено смешением вод загрязненной реки с водами залива. Фактор 2 выделил Mn и Fe, концентрация которых в водной среде значительно зависит от смены окислительно-восстановительных условий, а также Al, Pb и Co. Концентрации этих элементов значительно повышены в придонных водах залива и, вероятно, могут отражать их поступление из загрязненных донных отложений.

Русловая часть Усть-Илимского водохранилища. За все периоды исследований концентрации O_2 в воде I и II участков водохранилища (8,7-13,7 мг/л и 9,7-11,9 мг/л, соответственно) удовлетворительны для жизнедеятельности гидробионтов. При высоких концентрациях O_2 в поверхностных водах III, IV и V частей Усть-Илимского водохранилища, в придонных водах определено пониженное содержание O_2 (до 1,8 мг/л).

Из биогенных компонентов, только концентрации NO_3^- в воде Усть-Илимского водохранилища достаточно равномерно распределены по акватории водоема. Концентрации NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , а также Сорг подвержены большим вариациям. В вертикальном распределении наблюдается увеличение их концентраций в придонном слое, по сравнению с поверхностным на большинстве станций отбора проб. При этом, также как для концентраций кислорода, наибольшие вариации определены в придонных водах III, IV и V частей водохранилища.

В водах верхнего бьефа Братской ГЭС, поступающих на входной створ Усть-Илимского водохранилища, величина минерализации в разных горизонтах вод изменяется от 123,6 до 129,7 мг/л. Средние концентрации HCO_3^- составляют 79,8 мг/л, SO_4^{2-} – 12,3 мг/л, Cl^- – 3,4 мг/л, Ca^{2+} – 20,3 мг/л, Mg^{2+} – 4,4 мг/л, Na^+ – 3,9 мг/л и K^+ – 1,18 мг/л. На I участке Усть-Илимского водохранилища интервал колебаний концентраций главных ионов также незначителен, минерализация близка к средним показателям вод приплотинной части Братского водохранилища.

Как в период со значительной техногенной нагрузкой (2004 г.), так и в период ее снижения (2017 г.) на II участке водохранилища ниже впадения Усть-Вихоревского залива происходит увеличение концентраций большинства главных ионов. Концентрации HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} уже в 0,5 км ниже по течению от устья залива близки к таковым на I участке Усть-Илимского водохранилища. Более значительное влияние на состав вод русловой части водохранилища оказывает поступление Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ , которые в воде всего II участка выше, чем на I участке водоема. Поток загрязненных вод четко прослеживается вдоль левого берега Усть-Илимского водохранилища.

На III участке средние концентрации главных ионов (кроме Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+) близки к таковым на I участке водохранилища. Увеличение их концентраций, по сравнению с поверхностными, наблюдается в придонных водах Шаманского (SO_4^{2-} и Mg^{2+}), Ершовского (SO_4^{2-} и Mg^{2+}) и Воробьевского (HCO_3^- , Cl^- , Na^+ и Ca^{2+}) расширений. Сравнивая полученные результаты с материалами гидрогеохимической съемки бассейна Усть-Илимского водохранилища (Усть-Илимское водохранилище ..., 1975), можно отметить их взаимосвязь с химическим составом подземных вод. Так, в районе пролива между Шаманским и Ершовским расширениями первый от поверхности водоносный горизонт представлен сульфатными щелочноземельными водами, а в начале Воробьевского расширения – гидрокарбонатными щелочноземельными, в катионном составе которых преобладает натрий.

Особенностью формирования V части водохранилища является высокая доля подземного питания, определенная еще для вод незарегулированной р. Илим (Стрижева, 1985). В связи с этим, в воде Илимской части водохранилища содержание главных ионов выше, чем в Ангарской части. Наибольшие концентрации главных ионов приурочены к придонному горизонту, что особенно выражено в районе зал. Туба, где до создания Усть-Илимского водохранилища зафиксированы самоизливающие скважины дебитом до 6,3 л/с. Здесь в придонной воде концентрации Na^+ (25,3 мг/л), SO_4^{2-} (26,9 мг/л), HCO_3^- (146,9 мг/л) и Ca^{2+} (36,3 мг/л) достигают, а для Cl^- (42,1 мг/л) превышают, их концентрации в Вихоревском заливе.

На IV участке в поверхностных водах концентрации макроэлементов и величина минерализации (123,9-145,2 мг/л) находятся на близком уровне с водой III участка. Также как в Илимской части водохранилища, в придонных водах IV участка концентрации главных ионов повышены. Наиболее высокие концентрации отмечены в придонных водах верхнего бьефа Усть-Илимской ГЭС (рис. 4). Здесь минерализация достигает 359,3 мг/л. Одной из вероятных причин такого распределения главных ионов, в особенности Cl^- и Na^+ , может являться поступление минерализованных вод хлоридного состава контрастного гидрохимического купола, расположенного, по данным (Овчинников, 1999), на участке от залива Туба до плотины ГЭС.

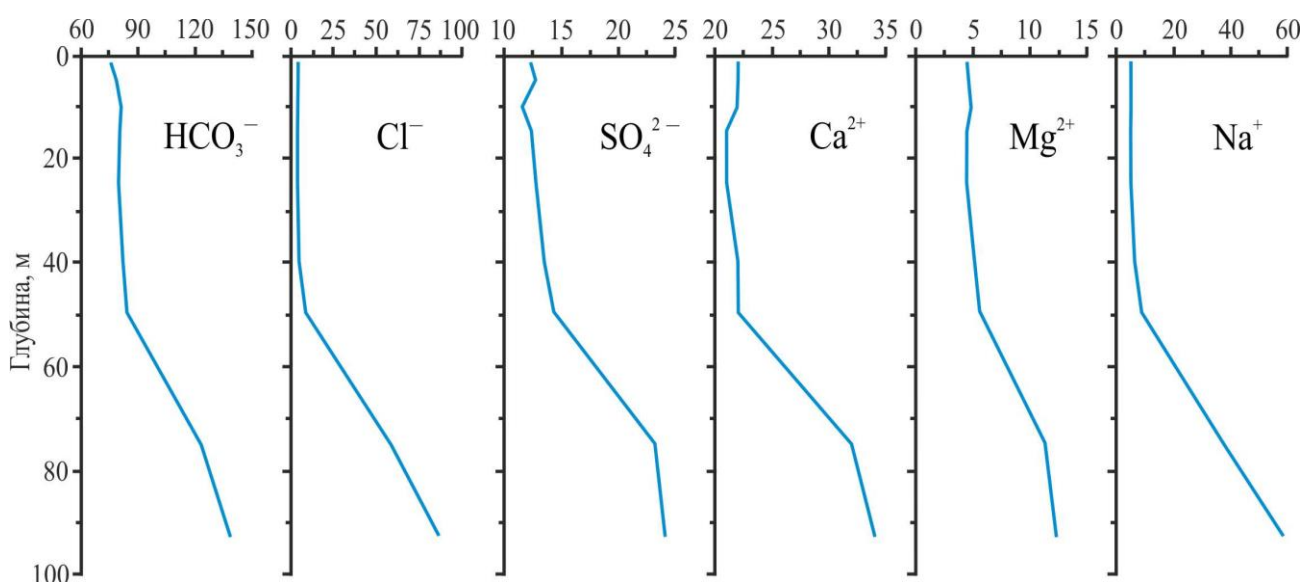


Рис. 4. Вертикальное распределение концентрации главных ионов (мг/л) в воде верхнего бьефа плотины Усть-Илимской ГЭС

Распределение Al, Mn, Fe, Cu, As, Zn, Cd и Pb в воде русловой части Усть-Илимского водохранилища отличается неоднородностью, как во временном, так и пространственном аспекте (рис. 5). Объективно оценить антропогенное воздействие и выделить источники поступления микроэлементов позволяют фоновые характеристики водных объектов, находящиеся с водоемом в близких географических и климатических зонах. В связи с этим, сравнение гидрохимических параметров Усть-Илимского водохранилища проведено с концентрациями, полученными в воде нижнего участка Братского водохранилища. Для выявления факторов, влияющих на распределение микроэлементов в воде, выбраны микроэлементы, концентрация которых в 2 раза и более превышает условно фоновую концентрацию.

Антропогенные факторы. Как показано выше, наиболее значимым источником загрязнения Усть-Илимского водохранилища являются сточные воды промышленной зоны г. Братск, поступающие в р. Вихорева. Наибольшие превышения над условно фоновыми концентрациями для большинства элементов, а особенно Al, Mn, Fe и As, в воде I и II участков определены в районе впадения Усть-Вихоревского залива. Через 3,5 км их концентрации снижаются, а в 5 км ниже по течению от залива наблюдается резкое падение концентраций Fe, Mn, Al, As, Cd, Cu, Pb до фоновых значений. На этом участке снижение концентраций элементов в водной среде связано, главным образом, с разбавлением загрязненных вод большим объемом русловых вод Ангарской части Усть-Илимского водохранилища. Одновременно протекают процессы сорбции элементов на взвешенных частицах и осаждение в донные отложения, как это происходит в водных объектах, подверженных техногенному воздействию (Li et al. 2008; Varol, Şen, 2012). Невысокие концентрации большинства микроэлементов сохраняются на протяжении

около 15 км до д. Седаново, в районе которой наблюдается их увеличение в придонной воде.

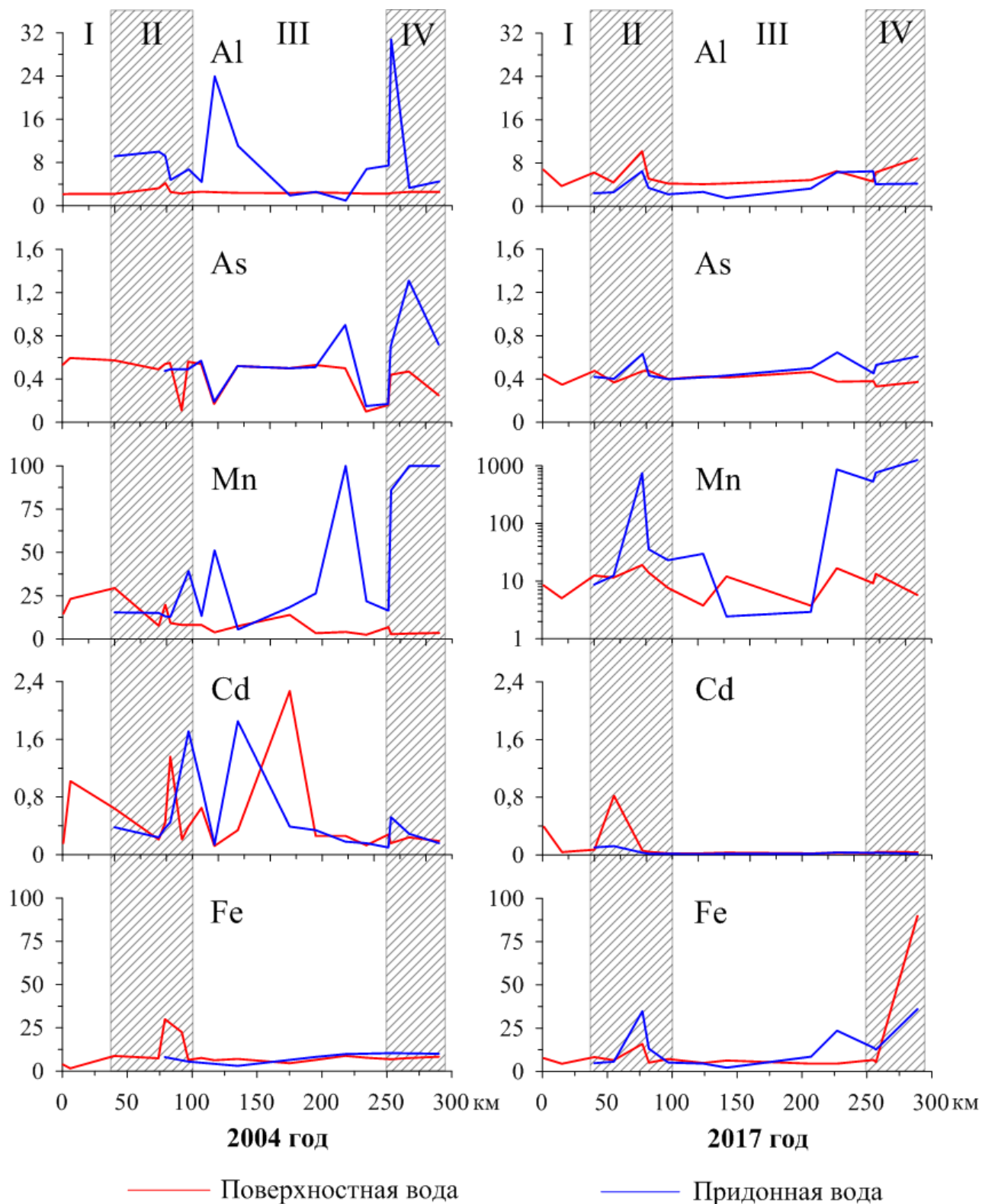


Рис. 5. Распределение микроэлементов (мкг/л) в поверхностной и придонной воде Ангарской части Усть-Илимского водохранилища в 2004 и 2017 гг.

I, II, III и IV – участки водохранилища (соответствуют рис. 1); километры обозначены по судовому ходу от Братской ГЭС до Усть-Илимской ГЭС

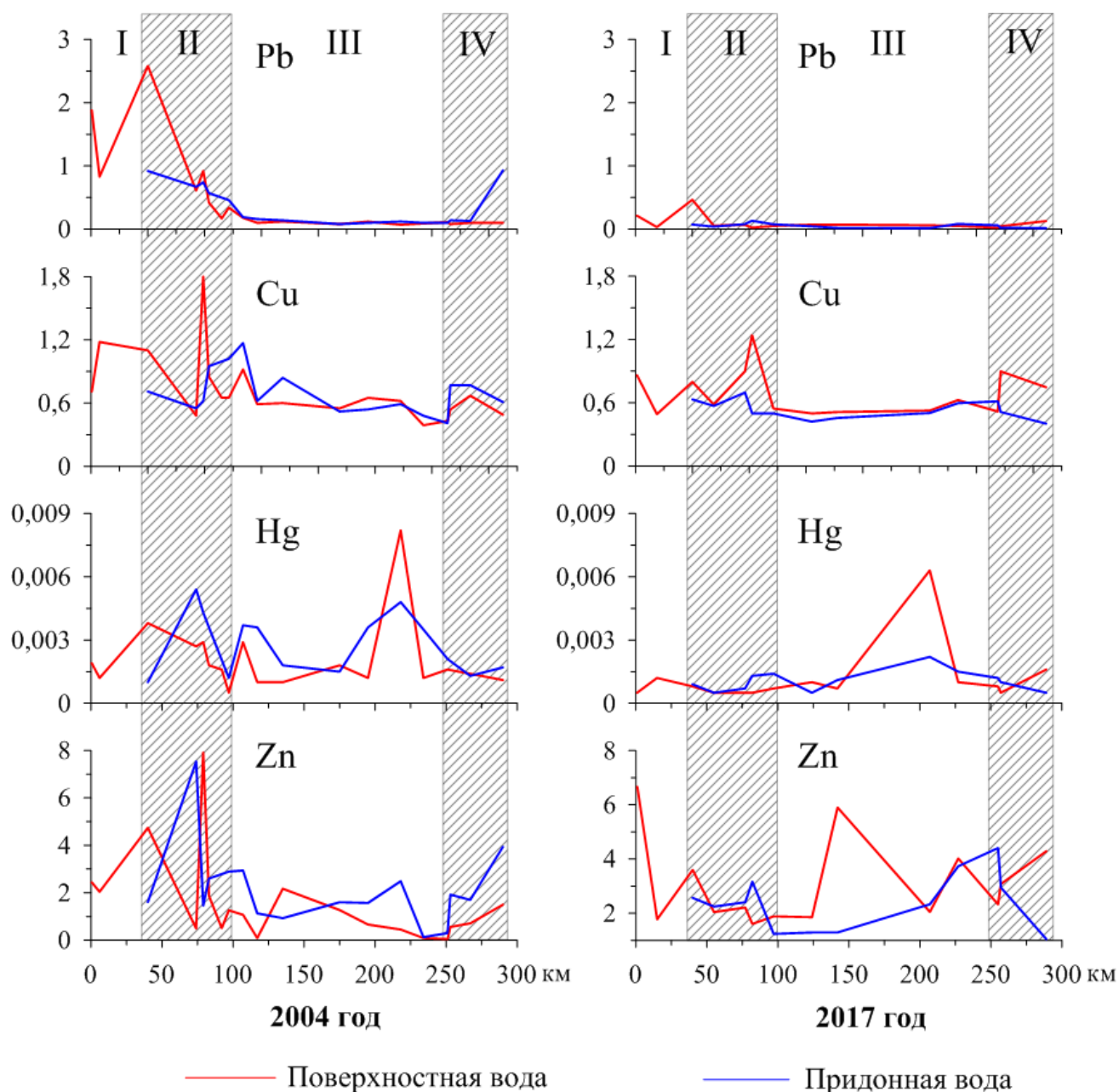


Рис. 5. (продолжение). Распределение микроэлементов (мкг/л) в поверхностной и придонной воде Ангарской части Усть-Илимского водохранилища в 2004 и 2017 гг.

I, II, III и IV – участки водохранилища (соответствуют рис. 1); километры обозначены по судовому ходу от Братской ГЭС до Усть-Илимской ГЭС

Поставщиком элементов антропогенного происхождения для Усть-Илимского водохранилища являются газопылевые выбросы, атмосферные осадки и поверхностный сток с г. Братск. Это подтверждает изучение их химического состава, проведенное в районе влияния промышленной зоны города (Рунова и др., 2008; Мясников и др., 2009; Янченко и др., 2010). Высокие концентрации Al, Mn, Zn, Cd, Pb обнаружены в воде правого берега, Mn – в воде левого берега водоема нижнего бьефа Братской ГЭС. Наиболее значимым источником поступления Al и Pb в

окружающую среду является алюминиевый завод, Mn – выбросы ТЭЦ-6 и завода ферросплавов.

Природные факторы. В воде III и IV участков водохранилища концентрации большинства рассматриваемых микроэлементов близки к фоновым, что определяет довольно значимую особенность водоема использовать свои ресурсы для самоочищения вод. Однако, в пределах этих участков выделяются точки наблюдений, на которых концентрации микроэлементов в воде выше не только фоновых, но и выше, чем в более техногенно-нагруженной зоне (рис. 5). Также как для главных ионов – это воды, в основном придонные, Шаманского, Ершовского, Воробьевского расширений, Илимской части и верхнего бьефа плотины Усть-Илимской ГЭС.

При различном спектре микроэлементов, повышающихся на отдельных точках наблюдения, наиболее часто встречаемыми являются Mn, Al и Fe. Подвижность этих элементов в околонейтральной, окислительной среде очень низкая (Plant, Raiswell, 1983). В связи с этим, их происхождение в водной среде III, IV и V участков водохранилища нельзя объяснить только антропогенными источниками, приуроченными к I и II участку. Эти микроэлементы относятся к основным порообразующим элементам, поэтому устойчивое в межгодовом аспекте накопление концентраций Mn, Fe и Al в придонном слое воды, может свидетельствовать об обогащенности этими элементами водовмещающих пород. Значимые коэффициенты корреляции ($p < 0,01$) между компонентами основного ионного состава и микроэлементами в придонных водах, выявили тесную взаимосвязь Mn со всеми компонентами основного ионного состава, Fe с SO_4^{2-} , Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺ на III участке; Mn с Cl⁻ и Na⁺, Fe с Na⁺ на IV участке; Mn с Cl⁻ и Na⁺, Cd, Hg с Cl⁻ и Na⁺ на V участке водохранилища, что позволяет сделать предположение о влиянии подземных вод на микроэлементный состав воды Усть-Илимского водохранилища.

Глава 4. Донные отложения, как показатели антропогенной нагрузки на Усть-Илимское водохранилище

Химический состав донных осадков. В основном составе донных отложений доминирует терригенный материал алюмосиликатного состава. Выделяются участки с повышенными ассоциациями элементов основного состава: д. Дубынино (Na_2O , SiO_2 , CaO, TiO_2), вход в зал. Усть-Вихоревский (MgO , Al_2O_3 , K_2O), Ершовское расширение (P_2O_5 , MnO, Fe_2O_3). До максимальных концентраций возрастает S в 5 км ниже впадения Илимской части. Пространственное распределение валовых концентраций Mn, Fe, Al, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, As, Pb, Cd и Hg в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища показано на рисунке 6.

По накоплению микроэлементов в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища выделяется две зоны, для которых характерны ассоциации

микроэлементов с повышенными, относительно условно фоновых, концентрациями (коэффициент концентрации (КК)). В качестве условно фоновой концентрации использована медиана концентраций элементов, определенных в донных отложениях всего Усть-Илимского водохранилища. Наиболее контрастная зона, на которой в разной степени повышаются концентрации всех рассматриваемых элементов, приурочена к Усть-Вихоревскому заливу. По КК здесь определяется следующая ассоциация элементов: $Cd_{6,1}-Hg_{4,1}-Zn_{2,0}-Mn_{1,7}-Cr_{1,6}-Pb$, Fe, Cu, Co, $As_{1,5}$. В месте впадения р. Вихорева в Усть-Вихоревский залив гидродинамические параметры способствуют осаждению взвешенного материала, а, следовательно, выведению из водной среды и накоплению в донных отложениях элементов техногенного происхождения. В устье Усть-Вихоревского залива концентрации элементов, кроме Cd, Hg, Mn, Cu и Pb, в донных отложениях находятся на уровне условно фоновых (рис. 6), что связано с поступлением в эту зону менее загрязненного терригенного материала, переносимого водами руслевой части.

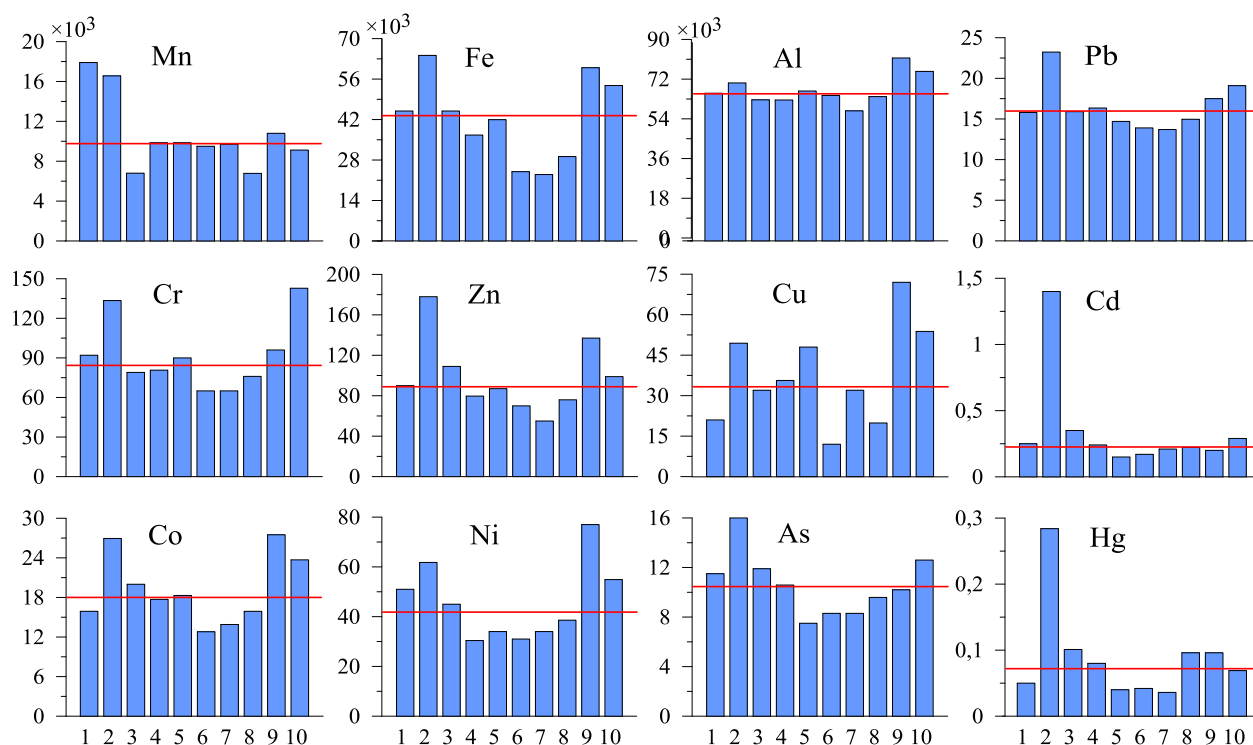


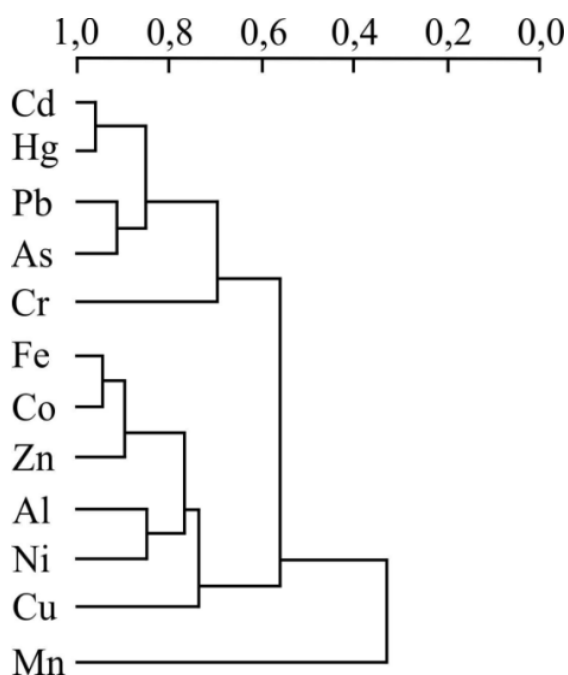
Рис. 6. Концентрация микроэлементов (мг/кг) в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища

1 – Верхняя часть 2 – Вихоревский залив; 3 – Бурдойский залив; 4 – устье Усть-Вихоревского залива; 5 – Седановское расширение; 6 – Шаманское расширение; 7 – Ершовское расширение; 8 – Воробьёвское расширение; 9 – Устье Илимской части; 10 – Сизовское расширение.

Вторая менее контрастная зона представляет собой достаточно обширный участок от впадения Илимской части до плотины Усть-Илимской ГЭС. По КК в районе впадения Илимской части выделены элементы с повышенными

концентрациями: $Cu_{2,1}-Ni_{1,8}-Zn,Co_{1,5}$. В районе плотины Усть-Илимской ГЭС остается повышенной концентрация $Cu_{1,6}$ и увеличивается концентрация $Cr_{1,7}$. Несмотря на то, что КК остальных элементов на выделенном участке не превышают 1,5, их концентрации выше фонового значения (рис. 6). Увеличение концентраций в донных отложениях IV участка водохранилища может быть объяснено поступлением взвешенных веществ с водами Илимской части и их седиментацией, которой способствует само сооружение плотины Усть-Илимской ГЭС.

Для оценки совместных источников поступления и миграционных особенностей поведения элементов проведен кластерный корреляционный анализ (рис. 7), который четко выделил две группы элементов.



К первой группе относятся наиболее токсичные тяжелые металлы (Cd, Pb, Hg) и As, накопление в донных отложениях которых, в большей степени, отражает деятельность человека. Ко второй – элементы группы железа (Fe, Co, Ni), Al и Zn. При общей положительной взаимосвязи, только Mn ни с одним из исследуемых элементов не имеет значимых корреляций.

Рис. 7. Дендрограмма корреляционного анализа микроэлементного состава донных отложений Усть-Илимского водохранилища

Формы нахождения микроэлементов в донных отложениях. В донных отложениях Усть-Илимского водохранилища (рис. 8) доля водорастворимой фракции, которая с экологических позиций считается самой опасной, составляет в среднем для всех элементов от 9,7 до 0,0 % (здесь и далее приводятся данные в % от суммы фракций), при концентрациях $Mn > Cd > Co > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Pb$, Fe, Al. В легкообменной фракции находятся адсорбированные ионы $Mn > Cd > Co > Zn > Cr > Cu > As > Ni > Fe > Pb > Al$ (от 31,8 до 0,3 %), в карбонатной фракции – $Mn > Cd > Co > Cr > Zn > Cu > Fe > As > Ni > Pb > Al$ (от 8,9 до 0,2 %). Доля карбонатной фракции невысокая, в связи с тем, что в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища определяющими являются частицы алюмосиликатного состава. При близком спектре элементов в первых трех фракциях, в органической фракции соотношение между элементами меняется $Cd > Cu > Ni > Fe > Co > Cr > Zn > As > Mn > Al > Pb$. Во фракции аморфных гидроксидов выстроен следующий ряд: $Cd > Cu > Pb > Zn > Co > Fe > As > Ni > Mn > Cr > Al$ (от 10,3% до 0,3 %).

Элементы, находящиеся в следующих фракциях, относятся к наиболее закрепленным. В донных отложениях Усть-Илимского водохранилища по концентрации элементов во фракции легкоразрушающихся силикатов: Ni>Pb>Cu>Zn>Fe>Co>As>Cd>Cr>Al>Mn (от 46,0 до 9,2%), в остаточной фракции находятся Al>Cr>As>Pb>Co>Fe>Ni>Zn>Cu>Mn>Cd (от 96,2 до 24,5%). Сумма этих фракций больше 90 % показывает достаточно прочное закрепление Pb, Al, Ni и Cr в донных отложениях.

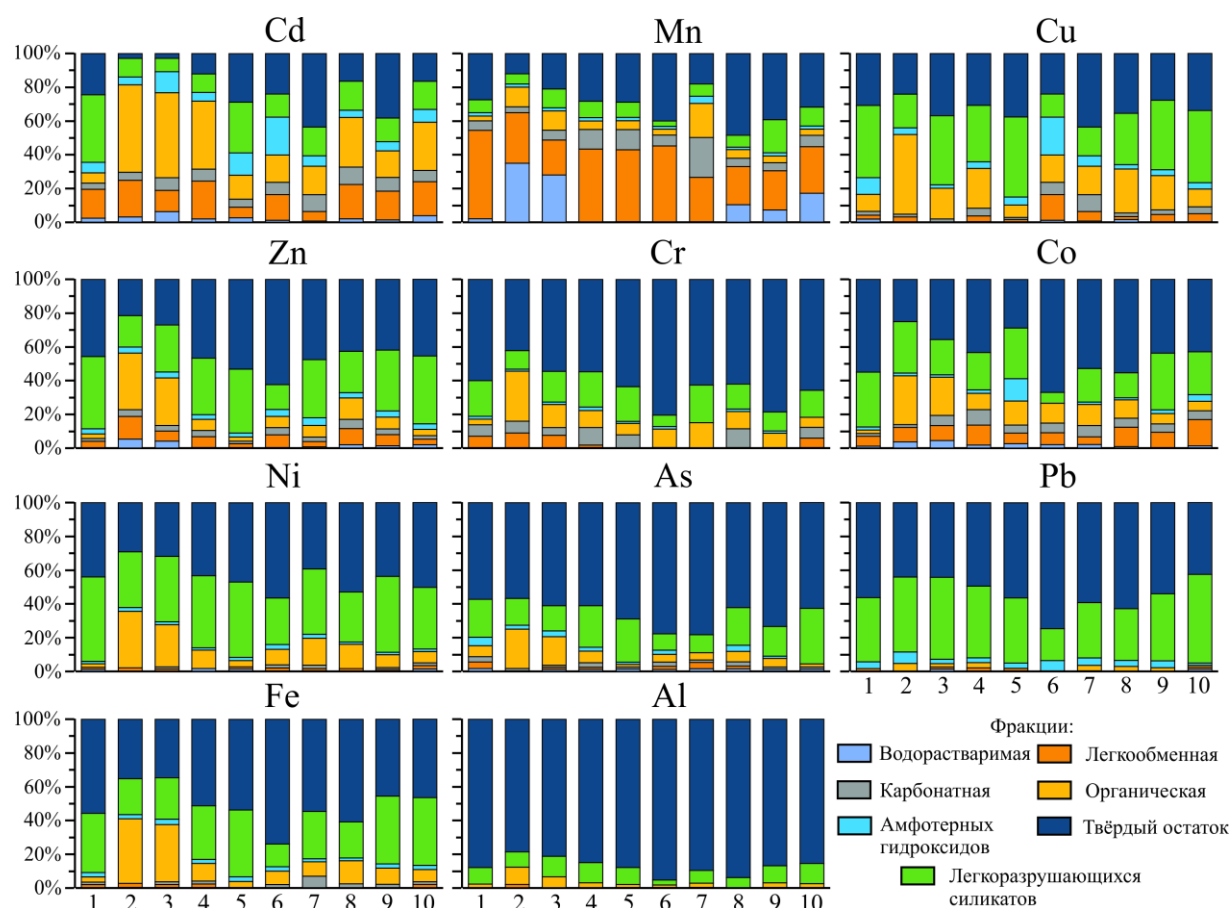


Рис. 8. Распределение концентраций элементов по фракциям (процент от суммы фракций) в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища.

1 – Верхняя часть; 2 – Вихоревский залив; 3 – Бурдойский залив; 4 – устье Усть-Вихоревского залива; 5 – Седановское расширение; 6 – Шаманское расширение; 7 – Ершовское расширение; 8 – Воробьёвское расширение; 9 – Устье Илимской части; 10 – Сизовское расширение.

В донных отложениях Усть-Илимского водохранилища доля Hg в водорастворимой и кислоторастворимой фракциях невелика – от 0,1 до 1,4 %. Способность Hg легко образовывать комплексы с органическим веществом (Hiller et al., 2010) определяет ее присутствие в органической фракции (от 10,5 до 81,6 %), что подтверждается и сильной корреляционной зависимостью между Сор_{орг} и Hg. Ртуть, присутствующая в донных осадках в прочносвязанной в решетке минералов фракции

и твердом нерастворимом остатке (сульфидная), составляет от 13,4 до 22,1% и от 4,5 до 41,0 %, соответственно.

Особенности распределения микроэлементов в спектре постадийных вытяжек донных отложений из различных по техногенной нагрузке районов Усть-Илимского водохранилища наглядно показывают техногенную геохимическую аномалию, приуроченную к Усть-Вихоревскому заливу. Здесь значительно увеличиваются доли подвижных и потенциальных подвижных форм всех изучаемых элементов, а закрепленных форм становится меньше (рис. 8). Также отмечено увеличение концентраций всех исследуемых элементов в органической фракции, что связано с большим количеством органики техногенного происхождения, поступившей с р. Вихорева. По данным (Госдоклад ..., 2015) только за один год в р. Вихорева поступило 779 т взвешенных веществ, 7109,7 т лигнина, 31 т нефтепродуктов и т.д. По мере удаления от источника загрязнения соотношение основных форм нахождения в донных отложениях меняется, в частности, резко уменьшаются концентрации элементов в органической форме (рис. 8). В русловой части Усть-Илимского водохранилища, где влияние Вихоревской зоны уменьшается, распределение большинства элементов в спектре постадийных вытяжек достаточно равномерно. Выделяются и исключения, которые, в большей степени, приурочены к участку от впадения Илимской части до плотины Усть-Илимской ГЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило выявить основные факторы, обуславливающие особенности химического состава вод и донных отложений Усть-Илимского водохранилища:

1. Несмотря на снижение долговременной техногенной нагрузки, основным антропогенным источником загрязняющих веществ для Усть-Илимского водохранилища, являются сточные воды промышленной зоны г. Братск, поступающие в р. Вихорева и оказывающие влияние на концентрацию в воде реки, в основном, SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , O_2 , Cr, Mn, Co, Pb и Сорг. Поступление загрязненных вод реки определяет техногенное воздействие на гидрохимический состав Усть-Вихоревского залива. Уменьшение концентраций главных ионов и микроэлементов в воде залива связано, в первую очередь, с процессами разбавления. Вместе с этим, повышенные, по сравнению с поверхностными, концентрации микроэлементов, в основном Mn, Fe, Al, Pb и Co, в придонных водах указывают на вторичное загрязнение, связанное с долговременной аккумуляцией в донных отложениях веществ антропогенного происхождения.

2. Антропогенное влияние на русловую часть Усть-Илимского водохранилища прослеживается на участке, прилегающем к Усть-Вихоревскому заливу (II участок). Вторым по значимости источником загрязнения Усть-Илимского водохранилища являются поступление загрязняющих веществ со всей территории г. Братск, влияние

которых определено в воде верхнего бьефа Братской ГЭС (I участок водохранилища).

3. Симбатное повышение концентраций главных ионов и микроэлементов в воде участков в меньшей степени подверженных антропогенной нагрузке (III, IV и V участки водохранилища) может свидетельствовать об их поступлении с подземными водами. Однако, влияние этих природных источников локально и, вследствие нивелирования большими объемами вод Усть-Илимского водохранилища, отражается только на химическом составе придонных горизонтов.

4. Изучение химического состава донных осадков позволило выделить участки водоема, отличающиеся по степени антропогенной нагрузки. Четко выделяется техногенная зона Усть-Вихоревского залива, влияние которой распространяется и на русловую часть водоема. В донных отложениях этой зоны элементы техногенного происхождения выводятся из водной среды и накапливаются в донных отложениях. Менее значимым участком с повышенными концентрациями элементов в донных отложениях является участок водохранилища от впадения Илимской части до плотины Усть-Илимской ГЭС.

5. Фракционный анализ элементов в донных отложениях показывает, что в геохимических условиях среды Усть-Илимского водохранилища наиболее подвижными являются Cd и Mn, потенциально подвижными – Hg, Zn и Cu, закрепленными – Pb, Ni, Al, Cr, As, Co и Fe. Высокая доля подвижных и потенциально подвижных форм элементов определяет роль донных отложений водохранилища, как вторичного источника загрязнения водной среды.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК, Scopus, WoS

1. Полетаева В.И., Пастухов М.В., Бычинский В.А., Долгих П.Г. Биогенные элементы и кислородный режим Богучанского водохранилища в период его заполнения // Проблемы региональной экологии – 2016. – № 5. – С. 64-69.

2. Полетаева В.И., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Особенности формирования гидрохимического режима Усть-Илимского водохранилища // Вода: химия и экология. – 2017. – № 10. – С. 11-17.

3. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., **Dolgikh P.G.** Geochemical characteristics of microelement distribution in surface sediments of Ust-Ilimsk Reservoir // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 321: 012042.

4. Poletaeva, V.I., Pastukhov, M.V., **Dolgikh, P.G.** Trace Element Compositions and Water Quality Assessment in the Angara River Source (Baikal Region, Russia) // Water. – 2022. – V. 14: 3564.

5. Долгих П.Г., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Условия формирования гидрохимического режима р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива (Усть-Илимское

водохранилище) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 92-107.

Публикации в сборниках и материалах научных конференций

6. **Долгих П.Г.**, Полетаева В.И. Распределение биогенных элементов в воде р. Вихорева и Вихоревского залива Усть-Илимского водохранилища при техногенном воздействии // Вопросы естествознания. 2018. – № 3(17). – С. 58-63.

7. **Долгих П.Г.** Распределение биогенных элементов в водах Усть-Илимского водохранилища // IX сибирская конференция молодых учёных по Наукам о Земле (г. Новосибирск, 19-23 ноября 2018 г.). – Новосибирск: НГУ, 2018. – С. 183-185.

8. **Долгих П.Г.**, Полетаева В.И. Техногенное поступление загрязняющих веществ с рекой Вихорева в Усть-Илимское водохранилище // Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции по геологии и геофизике (с. Максимиха, 26-31 августа 2019 г.), Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2019 г. – С. 32-34.

9. Полетаева В.И., Пастухов М.В., **Долгих П.Г.** Распределение и формы нахождения микроэлементов в донных отложениях Усть-Илимского водохранилища // Труды VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.). – Т.2: Качество воды. Геоэкология. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. – С. 186-190.

10. **Долгих П.Г.** Макрозообентос как показатель экологического загрязнения вод Усть-Илимского водохранилища // Труды VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.). – Т.2: Качество воды. Геоэкология. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. – С. 124-128.

11. **Долгих П.Г.** Полетаева В.И., Пастухов М.В. Техногенное поступление микроэлементов в Вихоревский залив Усть-Илимского водохранилища // Материалы Всерос. конф. посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона «Современные направления развития геохимии» (Иркутск, 21-25 ноября 2022). – Иркутск: ИГ СО РАН, 2022. – Т. 1 – С. 167-170.

12. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., **Dolgikh P.G.**, Tsvetkova E.A. Hydrochemical characteristic and water quality of the runoff of lake Baikal (sources of the Angara River) // Тезисы докладов V Международной научной конференции «Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Восточной Азии» (Иркутск, 23-26 августа 2022 г.). – Иркутск: ИГ СО РАН, 2022. – С. 133.

13. **Долгих П.Г.** Полетаева В.И., Пастухов М.В. Поступление и распределение микроэлементов в воды Усть-Илимского водохранилища // Всероссийская конференция молодых учёных «Современные проблемы геохимии 2023» (Иркутск-Байкал, 11-16 августа 2023 г.). – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2023. – С 51-53.