

*На правах рукописи*

*В.И. Полетаева*

Полетаева Вера Игоревна

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОПРЯЖЕННЫХ СРЕД  
«ВОДА – ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ» И ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК  
КРУПНОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ НА АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ  
(Р. АНГАРА И КАСКАД ЕЕ ВОДОХРАНИЛИЩ)**

Специальность: 1.6.21 – Геоэкология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора 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 консультант:** **Руш Елена Анатольевна,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

**Официальные оппоненты:** **Мазухина Светлана Ивановна,**  
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник  
Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты

**Белкина Наталья Александровна,**  
доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
Института водных проблем Севера – обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск

**Чарыкова Марина Валентиновна,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. кафедрой  
геохимии Института наук о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** ФГБУН Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ

Защита состоится 5 февраля 2025 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН)

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, стр. 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.

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность.** В результате хозяйственной деятельности человека в биосфере происходят изменения, приводящие к значительной перестройке всех природных экосистем. Ярким примером преобразований водных экосистем является создание водохранилищ, которое сопровождается изменением не только самих водных объектов, но и прилегающих к ним территорий. Геохимические циклы элементов в новом природно-антропогенном водоеме, также как и в природном, определяются постоянным взаимодействием между собой абиотических и биотических компонентов. Однако, замедление водообмена и изменение условий седиментации после зарегулирования реки существенно изменяют миграционные характеристики элементов.

Поступление потенциально опасных элементов антропогенного происхождения со сточными водами, поверхностным стоком и атмосферным переносом с территорий промышленных зон усугубляет негативное воздействие на новые природно-антропогенные водные экосистемы. За счет дополнительного привноса органических и неорганических веществ геохимический облик всех его компонентов еще более трансформируется. Судьба поступающих в водохранилища элементов зависит от внешних и внутренних условий: гидрологических и метеорологических параметров, характера седиментации, продуцирования и деструкции органического вещества, окислительно-восстановительных процессов и т.д. Выделять источники поступления элементов в водоем, контролировать межгодовые изменения, определять факторы формирования химического состава абиотических и биотических компонентов, факторы самоочищения и/или, напротив, деградации водной системы – основные направления научных исследований, способствующие пониманию круговорота вещества в условиях современной антропогенной нагрузки. На основе таких исследований можно оценить возможность миграции элементов при изменении условий окружающей среды и вероятность их попадания в живые организмы, сделать прогноз развития природно-антропогенных водных экосистем, а также разработать научно-обоснованные стратегии для предотвращения деградации природных комплексов.

К крупным рекам России, ландшафт бассейнов которых коренным образом преобразован после их зарегулирования, относится р. Ангара – единственный сток чистейшего пресного озера Байкал. Превращение реки в систему проточных водоемов озерного типа (Ангарскую водную систему) связано с созданием на ней каскада водохранилищ – Иркутского, Братского, Усть-Илимского и Богучанского. Зарегулирование р. Ангары оказало влияние не только на экосистему реки, но и на оз. Байкал, уровень которого после создания Иркутского водохранилища поднялся в

среднем на 1 м. Помимо создания каскада водохранилищ, уязвимость пресноводной Ангарской системы значительно усиливают расположенные в ее бассейне крупные промышленные агломерации. Необходимость сохранения этого уникального, но уже значительно трансформированного в результате хозяйственной деятельности человека природного наследия служит основанием для изучения механизмов его эволюции в период антропогенеза. При этом, чрезвычайно важной и актуальной задачей, от решения которой существенно зависят направленность и подходы к решению социально-экономических и экологических проблем как на региональном, так и федеральном уровнях, является достоверная оценка степени антропогенной нагрузки на каждый водоем Ангарской системы. В связи с вышесказанным, проведенные по теме диссертационной работы научные исследования способствуют достижению цели Программы фундаментальных научных исследований в РФ, принятой на долгосрочный период (2021-2030 гг.) (Постановление правительства России № 3684-р, 31.12.2020): «получение новых знаний об основных закономерностях строения, функционирования и развития человека, общества, природы» и обеспечивают решение ее приоритетной задачи: «обеспечение своевременного распознавания возникающих больших вызовов и формирование приоритетов в рамках научных исследований для ответа на такие вызовы».

**Степень изученности проблемы.** Теоретические представления о трансформации водных экосистем при переходе речного режима в режим водохранилищ (изменения гидрологических и гидрохимических характеристик, ландшафтов, переформирование уровня подземных вод, смена биоразнообразия и т.д.) детально изложены в работах (Авакян, 1987; Эдельштейн, 1998; Ligon et al., 1995; Wildi, 2010). Далее при изучении геохимического состава новой природно-антропогенной водной экосистемы учитывают как природные (климат, тектоника, литология и т.д.), так и антропогенные факторы (Gaury et al., 2018; Viers et al., 2019; Ochoa-Contreras et al., 2021), которые неразрывно связаны между собой.

К одним из наиболее распространенных загрязнителей природных сред относят микроэлементы (Meena et al. 2017; Dippong et al. 2019), значительные количества которых попадая в водоем остаются в нем (Kumar et al. 2019) и нарушают естественные гео- и биохимические циклы. В первую очередь, поступающие элементы антропогенного происхождения влияют на гидрохимический состав, делая воду малопригодной или непригодной для использования в хозяйственно-бытовых и питьевых целях (Naque et al., 2020; Rolón et al., 2021). Благодаря процессам адсорбции на взвешенных частицах и последующей их седиментации, микроэлементы обладают способностью активно накапливаться в донных отложениях (Завальцева и др., 2016; Huang et al., 2020), которые рассматриваются, как депонирующая среда и как основной

индикатор геоэкологического состояния водных экосистем (Лисицин, 1989; Даувальтер, 2012; Закруткин и др., 2020; Wang et al., 2019; Caballero-Gallardo et al., 2020). Особое внимание уделяется формам, в которых металлы(лоиды) присутствуют в донных отложениях (Fytianos and Lourantou, 2004; Alonso Castillo et al., 2013). т.к. на их основе можно оценить мобильность элементов в неразрывно связанной между собой цепочке «абиотические компоненты – живые организмы» (Моисеенко, 2017; Ciesielski et al. 2016; Rahman et al., 2022), в которой заключительным звеном является человек (Martínez-García et al. 2019; Moyo, Rapatsa, 2019).

Познание закономерностей преобразования вещества неразрывно связано с учением о геохимических барьерах, которое возникло при изучении эпигенетических процессов зоны гипергенеза (Перельман, 1966) и активно применяется при решении задач, направленных на изучение эколого-геохимических преобразований в биосфере в период антропогенеза и защиту окружающей среды от загрязнения (Лисицын, 1994; Емельянов, 1998; Алексеенко, 2006; Касимов, Борисенко, 2002; Гордеев, 2009; Хаустов, 2017).

Еще одним научным направлением, которое позволяет получить более полное представление о геохимических циклах как природных, так и антропогенных веществ, является изучение химического состава поровых вод (Шишкина, 1972; Гурский, 2017; Nahn et al., 2018; Valero et al., 2020). При этом, в отличие от морей и озер, состав поровых вод водохранилищ изучен недостаточно, хотя именно он может показать трансформацию химического состава донных отложений даже тогда, когда изменения их химических характеристик могут быть еще незаметными. В большей степени это становится важным при изучении последствий, связанных с поступлением веществ антропогенного происхождения.

В процессе эволюции аквальные системы, входящие в общий круговорот воды на Земле, создали свои механизмы самоочищения, которые изначально были направлены на нейтрализацию поступающих в них природных «загрязнителей» (пыльные бури, вулканическая деятельность и т.д.). Поступление в окружающую среду органических и неорганических веществ в период антропогенеза простимулировало использование водными экосистемами своих ресурсов (гидродинамические, физико-химические, микробиологические и гидробиологические) для нейтрализации загрязнения водной среды. В связи с этим, изучение механизмов самоочищения водоемов, поддерживающих экологическое равновесие мест обитания живых организмов (Алимов, 2000; Моисеенко, 1999), способствует изучению основных факторов развития водных систем, подверженных антропогенной нагрузке.

**Цель работы** – выявить особенности и закономерности, определяющие функционирование крупной природно-антропогенной водной системы (р. Ангара и созданный на ней каскад водохранилищ), и установить факторы, обуславливающие геохимические циклы элементов в период антропогенеза.

**Задачи исследования:**

1. Изучить пространственно-временную динамику и факторы формирования гидрохимического состава водоемов Ангарской системы в разной степени подверженных антропогенной нагрузке. Выделить наиболее антропогенно-нагруженные участки водоемов.

2. Изучить химический состав донных отложений на наиболее антропогенно нагруженных участках водохранилищ. На основе определения подвижных, потенциально-подвижных и прочносвязанных форм нахождения элементов выделить особенности их накопления, интенсивность миграции и оценить возможность влияния донных отложений на гидрохимический состав водоемов.

3. Изучить химический состав поровых вод донных отложений водохранилищ и выявить основные закономерности его формирования. Дать первоначальную характеристику диагенетических процессов в донных отложениях.

4. Сформировать представление об устойчивости и/или изменчивости водной системы, находящейся под высоким антропогенным прессом, на основе изучения факторов, определяющих механизмы миграции элементов, и процессов самоочищения, проходящих в природно-антропогенных водоемах.

5. Обосновать целесообразность применения региональных критериев, являющихся ключевым аспектом в области экологического нормирования и природопользования, и провести оценку качества вод Ангарской системы с учетом особенностей ее формирования.

**Основные объекты и методы исследования.** Изучение геосферных циклов элементов природного и антропогенного происхождения проведено на основе натуральных долговременных исследований, направленных на определение химического состава вод и донных отложений единой водной системы, включающей р. Ангару и созданные на ней Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища. В исследовании отдельно выделен исток р. Ангары, который хоть и относится к Иркутскому водохранилищу, является ключевой точкой в связанных между собой водных объектах – оз. Байкал и Ангарской водной системой. Фактический материал, полученный в ходе многолетних работ (более 20 лет) в этих единых по своему происхождению, но подверженных различным антропогенным воздействиям, водных объектах, стал фундаментальной основой, позволившей обоснованно подойти к изучению геохимических циклов элементов в крупных водных

экосистемах. Помимо основного ионного состава и биогенных компонентов, немаловажным аспектом представленной работы стало изучение широкого круга микроэлементов, которые, учитывая их малые содержания и низкий предел обнаружения применяемых ранее методов анализа, в Ангарской водной системе были изучены крайне недостаточно. Аналитические работы выполнены в аналитическом отделе ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия), аккредитованном в соответствии с 412-ФЗ РФ в 2016 г. на техническую компетентность в национальной системе аккредитации.

Методологической основой проведенных геоэкологических исследований, направленных на изучение эволюции крупной пресноводной системы в период антропогенеза, стал системный подход, ориентированный на раскрытие индивидуальности водных объектов, имеющих единое происхождение. Такой подход включает в себя изучение источников поступления веществ природного и антропогенного происхождения, пространственно-временной изменчивости химического состава абиотических компонентов водной экосистемы в разные по антропогенной нагрузке периоды, форм нахождения элементов в воде и донных отложениях и механизмов, определяющих миграцию химических элементов.

**Соответствие научной специальности.** Проведенные исследования и сформулированные в диссертации научные положения соответствуют направлению исследований, перечисленных в паспорте научной специальности 1.6.21 Геоэкология: 1. Изучение состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов; 2. Изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек Земли под влиянием природных и техногенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной природной среды; 3. Междисциплинарные аспекты стратегии выживания человечества и разработка научных основ регулирования качества состояния окружающей среды; 4. Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды и ее компонентов, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности; 5. Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод); 6. Разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, биологических, рекреационных, минеральных и энергетических ресурсов Земли.

**Научная новизна.** Впервые на современном научно-методическом уровне выполнен детальный анализ пространственно-временной динамики гидрохимического состава р. Ангары и каскада ее водохранилищ (протяженность

участка исследований от истока реки до плотины Богучанской ГЭС более 1400 км). Исследования, проведенные на взаимосвязанных между собой водоемах единой Ангарской системы, позволили оценить трансформацию гидрохимического состава р. Ангары после стока из оз. Байкал с учетом воздействия на нее природных и антропогенных источников.

Изучение особенностей распределения, накопления и миграции элементов в системе «вода – донные отложения» позволили выявить наиболее антропогенно-нагруженные участки Ангарской водной системы, а также установить основные факторы, влияющие на формирование геохимического состава природно-антропогенных водоемов. При этом, важным является подход, направленный на выявление миграционных особенностей элементов, посредством изучения состава поровых вод, которые являются связующим звеном между толщей воды и донными отложениями, а также индикатором проходящих в период седиментогенеза диагенетических процессов. Показано, что природные и антропогенные факторы формирования химического состава вод и донных отложений каждого водного объекта действуют взаимосвязано, определяя эволюцию всей Ангарской водной системы.

Определена роль седиментационных геохимических барьеров в формировании геосферных циклов элементов в динамичных условиях функционирования новой природно-антропогенной водной системы. Показано, что образованные после зарегулирования реки геохимические барьеры препятствуют распространению элементов техногенного происхождения по акватории водохранилища, а значит являются одним из основных факторов, определяющих процессы самоочищения водных экосистем.

Показана необходимость применения избирательного подхода, направленного на правильный выбор контрольного материала, используемого при оценке качества пресноводной Ангарской системы. Методически обоснована возможность использования результатов гидрохимических исследований истока р. Ангары в качестве индикаторных геохимических критериев.

Полученные в представленном исследовании результаты позволят в дальнейшем обоснованно подойти к изучению биогеохимических циклов и прогнозировать процессы эволюции природно-антропогенных водных экосистем.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ пространственно-временной динамики химического состава вод и изучение факторов формирования Ангарской системы показали, что каждый водоем имеет свои гидрохимические особенности, обусловленные поступлением элементов из природных и антропогенных источников.

2. Дифференциация поступающих в водохранилища Ангарской системы элементов антропогенного происхождения начинается в водной среде. В дальнейшем геохимические преобразования связаны с аккумуляцией и мобильностью элементов в донных отложениях. Стратификация концентраций элементов по глубине донных отложений отражает динамику их поступления из водной среды в различные по антропогенной нагрузке периоды. Высокие доли прочносвязанных форм элементов показывают, что их накопление в донных отложениях является главным механизмом самоочищения вод.

3. Седиментационные геохимические барьеры, сформированные при создании Ангарских водохранилищ, являются основным фактором, определяющим миграцию элементов и устойчивость находящихся под высоким антропогенным воздействием природно-антропогенных водоемов. Геохимические барьеры, накапливающие элементы антропогенного происхождения и препятствующие их распространению по акватории водоема, в тоже время, являются экологически опасными объектами с потенциалом негативного пролонгированного действия на водную среду.

4. В условиях осадкообразования Ангарских водохранилищ на формирование химического состава поровых вод, изменяющегося по акватории водоема и глубине донных отложений, влияют природные и антропогенные факторы: состав водной толщи, растворение осадочного материала, разгрузка подземных вод, поступление веществ техногенного происхождения и диагенетические преобразования.

5. Для совершенствования системы мониторинга в качестве индикаторных геохимических критериев, отражающих природные условия формирования и позволяющих объективно оценить вызванные антропогенной деятельностью изменения гидрохимического состава водоемов Ангарской системы, предложено использовать концентрации микроэлементов в воде истока р. Ангары, полученные за долговременный период наблюдений.

**Теоретическое и практическое значение результатов исследования.** Задачи исследования направлены на решение фундаментальной проблемы в области геоэкологии – пониманию механизмов эволюции и устойчивости геосферных циклов элементов в природно-антропогенных ландшафтах. Изученная в работе пространственно-временная динамика химического состава вод и донных отложений позволила выделить основные факторы, влияющие на распределение и накопление элементов, определить степень антропогенной нагрузки на водоемы, оценить потенциал использования крупной пресноводной системы своих ресурсов для самоочищения и установить возможность миграции элементов в системе «вода – донные отложения». Рассмотренные в работе различия и сходства в факторах формирования геохимического состава единых по своему происхождению водных

экосистем позволили по-новому взглянуть на процессы, проходящие в созданных человеком природно-антропогенных водоемах – водохранилищах. Совокупность полученных результатов является методической основой для анализа временных изменений, позволяющих выявить вектор эволюции, в водных экосистемах в период антропогенеза.

С позиции практической значимости результатов, наиболее важным аспектом исследования является оценка эколого-геохимического состояния и степени загрязнения уникальной, но в тоже время антропогенно измененной, Ангарской водной системы, с учетом природных особенностей ее формирования (в первую очередь, генетическая связь с чистейшим оз. Байкал). В работе предлагается в качестве региональных фоновых концентраций элементов использовать результаты по гидрохимическому составу истока р. Ангары, полученные за долговременный период наблюдений. Сравнение гидрохимических показателей созданных на реке водохранилищ с выделенными критериями, позволяет достоверно оценить антропогенное воздействие на природную среду в настоящее время и дает возможность осуществить прогноз ее неблагоприятных изменений в будущем. Отдельно следует выделить исследования, проведенные на р. Ангаре до создания Богучанского водохранилища и во время его заполнения. Полученные результаты являются неповторимыми наборами данных, с помощью которых можно доказательно оценить последствия, связанные с переходом водоемов от речного режима в режим водохранилища. Изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек Земли под влиянием природных и антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для человека продуктивной природной среды является одним из приоритетных направлений экологической политики РФ. Предложенная система мониторинга сформирует основу для корректировки существующих требований в области нормирования уровней загрязнения окружающей среды, что является стратегически важным для водных объектов Байкало-Ангарской водной системы – основного резервного фонда по запасам пресных питьевых вод не только для РФ, но и для всего мира.

**Достоверность и апробация результатов исследования.** Основные положения и выводы подтверждаются значительным объемом фактического материалы, полученного на натуральных объектах и проанализированного в аккредитованном аналитическом отделе ИГХ СО РАН по аттестованным методикам. Результаты работ отражены в отчетах тем госзадания ИГХ СО РАН, проектов РФФИ, в которых автор являлся руководителем (№ 12-05-98089-р\_сибирь\_a, № 16-05-00891) и исполнителем (№ 09-05-00884-а, № 14-45-04171, № 17-45-388089 р\_a), международного проекта «Mercury species and mercury isotopic fractionation in the food

chain of Lake Baikal», интеграционного проекта «Динамика и устойчивость природных экосистем Восточной Сибири в условиях изменения глобального и регионального климата и возрастающей антропогенной нагрузки» в интеграционной программе ИИЦ СО РАН (№ 0341-2016-0001), крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» (№ 075-15-2020-787), государственных контрактов (№ 16/12, № 63-57-31/12, № 63-41-34/14).

Основные научные положения работы обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях. В том числе, на Международной конференции «Проблемы экологии в современном мире в свете учения В.И. Вернадского» (Тамбов, 2010); Goldschmidt (Prague, 2011); 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant (Nova Scotia, Canada, 2011); Всероссийской конференции «Фундаментальные проблемы экологии России» (Иркутск, 2017); Международной конференции «Пресноводные экосистемы – современные вызовы» (Иркутск, 2018); Всероссийской конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2009, 2015, 2019); Международной конференции, посвященной памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова (Иркутск, 2019); Международном симпозиуме «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» (Иркутск, 2022); V Международной конференции «Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Восточной Азии» (Иркутск, 2022); Всероссийской конференции «Геохимические методы поисков как инструмент обнаружения прямых признаков месторождений стратегических видов минерального сырья» (Москва, 2023) и др.

**Публикации.** Основные положения опубликованы в 110 научных трудах, из которых 32 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и баз цитирования WoS и Scopus, 2 работы в коллективных монографиях, 1 работа в Государственном докладе. Часть статей написаны в соавторстве со специалистами, не имеющими возражений против защиты данной работы. Часть результатов исследований вошла в зарегистрированную пространственную базу данных «Неорганические загрязнители в стоке оз. Байкал».

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 358 наименований, и двух приложений. Общий объем – 279 стр., включая 53 рисунка и 53 таблицы.

**Личный вклад автора.** В основу работы положен фактический материал, полученный при непосредственном участии автора в ходе экспедиционных работ на р. Ангаре и водохранилищах Ангарского каскада ГЭС в течение более 20 лет (1998-2022 гг.). В рамках научно-исследовательских тем автором поставлена цель,

сформированы задачи и разработана концепция работы, осуществлен выбор методик исследования и способов интерпретации полученных результатов.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность своим первым научным руководителям д.г.-м.н. Ковалю П.В. и д.г.-м.н. Ломоносову И.С. Автор выражает искреннюю благодарность к.б.н. Пастухову М.В. за его помощь в организации всех экспедиционных работ, грамотные советы при обсуждении полученных результатов и поддержку в период подготовки и написания работы. Автор отмечает значительный вклад к.б.н. Азовского М.Г., Бутакова Е.В., Долгих П.Г., Тарасюк Н.А., Цветковой Е.А. в проведении большого количества экспедиционных исследований. Автор признателен сотрудникам ИГХ СО РАН, проводивших химико-аналитические работы: Андрулайтис Л.Д., Арсенюк М.И., к.х.н. Айсуевой Т.С., Долгих П.Т., к.г.-м.н. Зарубиной О.В., Никитеевой М.С., Пахомовой Н.Н., к.х.н. Пройдаковой О.А., Рязанцевой О.С., к.х.н. Сокольниковой Ю.В., Старченко И.В., Судаковой Н.Д., Черниговой С.Е., к.х.н. Чупариной Е.В. Особая благодарность научному консультанту д.т.н. Руш Е.А., д.т.н. Васильевой И.Е., к.х.н. Полетаевой Л.Б. и к.г.-м.н. Бычинскому В.А. за ценные советы, которые помогли в формировании общего вида диссертационной работы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Основные характеристики и условия формирования р. Ангары и каскада ее водохранилищ**

В естественных условиях формирование гидрологического и гидрохимического режимов р. Ангары – единственного поверхностного стока оз. Байкал (рис. 1), происходило за счет вод озера, трансформированных по мере течения реки под действием притоков, подземных вод, литологических особенностей бассейна и т.д. (Бочкарев, 1959). Несмотря на то, что по-прежнему значительное влияние на созданную человеком крупную природно-антропогенную Ангарскую систему имеет оз. Байкал, каждому ее водоему присущи свои условия формирования как природного, так и антропогенного характера. В главе рассмотрены основные гидрологические параметры водохранилищ р. Ангары, дана характеристика геологического строения, тектоники и гидрогеологические особенности их бассейнов. Специфика и интенсивность хозяйственной деятельности позволили дифференцировать водохранилища по степени антропогенной нагрузки:

– Иркутское водохранилище (заполнение с 1956 г.) – водоем в меньшей степени подверженный антропогенной нагрузке, ввиду отсутствия крупных предприятий на его побережье. Иркутская ГЭС находится в крупном городе Прибайкалья – г. Иркутск. Однако, все основные градостроительные предприятия города расположены ниже ее плотины. К антропогенным источникам для водохранилища относятся небольшие

населенные пункты (в основном, частный сектор, турбазы), территории которых стремительно расширяются;

– Братское водохранилище (заполнение с 1961 г.), состоящее из Ангарской, Окинской и Ийской частей – водоем с высокой степенью антропогенной нагрузки. Поступление веществ техногенного происхождения в его экосистему связано с промышленными зонами гг. Усолье-Сибирское, Свирск, Братск. К наиболее значимым экологическим проблемам водоема относится крупномасштабное ртутное загрязнение абиотических и биотических компонентов, обусловленное работой цеха ртутного электролиза закрытого в 2012 г. предприятия «Усольехимпром» (Коваль и др., 1999; 2003). Антропогенная нагрузка на водоем определяется и использованием акваторий его заливов для накопления и транспортировки древесины в процессе лесозаготовительной деятельности;

– Усть-Илимское водохранилище (заполнение с 1974 г.), состоящее из Ангарской и Илимской частей – водоем с высокой степенью антропогенной нагрузки. Поступление веществ техногенного происхождения в его экосистему связано с промышленными зонами гг. Братск и Усть-Илимск. К основным источникам органических и неорганических веществ для водохранилища относятся сточные воды предприятий г. Братск, поступающие в р. Вихорева (с 1956 г.) и далее в Вихоревский залив Усть-Илимского водохранилища;

– Богучанское водохранилище (заполнение с 2012 г.) – самый «молодой» водоем Ангарской системы. В период исследований трансформация его геохимического состава, в большей степени, определяется динамичными процессами, происходящими после зарегулирования реки.

## **Глава 2. Методология исследования**

Обзор исследований по водным экосистемам в период антропогенеза, одной из главных проблем которого считается химическое загрязнение окружающей среды, определил основные направления настоящего исследования. В первую очередь, это изучение пространственно-временной динамики концентраций элементов в сопряженных средах «вода – донные отложения» в разные по антропогенной нагрузке периоды, форм нахождения элементов, являющихся показателями миграции и индикаторами геохимических преобразований. Более углубленный подход к рассмотрению геохимических циклов элементов в условиях природно-антропогенных водоемах определяется изучением состава поровых (пропитывающих донные отложения) вод, отражающего диагенетические процессы в донных отложениях, роли геохимических барьеров, образованных после зарегулирования реки, а также важного свойства водных экосистем – способности к самоочищению, которая в период антропогенеза имеет первостепенное значение для сохранения качества вод.

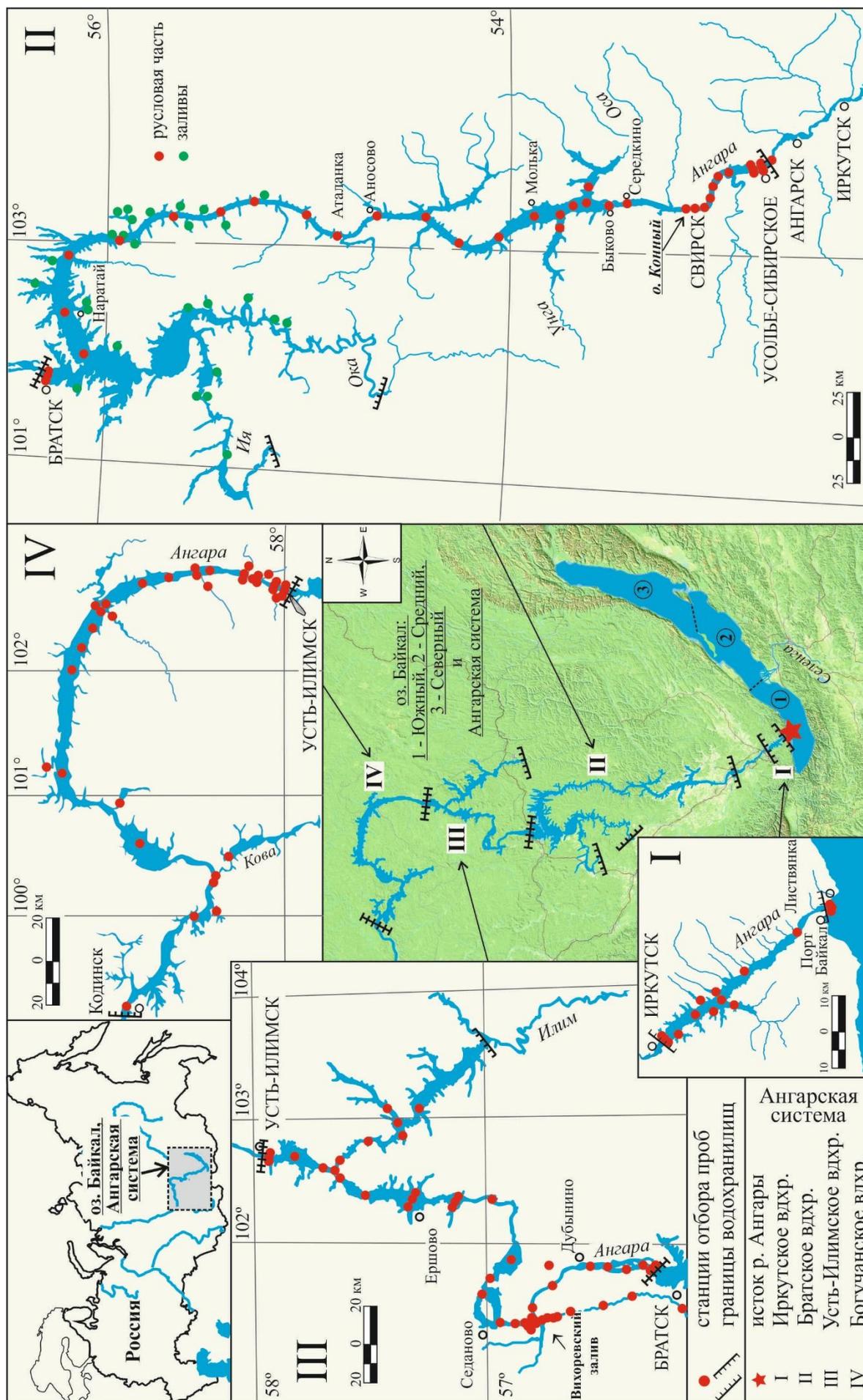


Рисунок 1 – Карта-схема станций отбора проб абiotических компонентов Ангарской водной системы

В основу работы положен фактический материал, собранный во время экспедиционных работ (1999-2022 гг.) в пределах Ангарской водной системы в разные по антропогенной нагрузке периоды. Мониторинговые станции отбора проб показаны на рисунке 1. На участках с наибольшей степенью антропогенного воздействия опробование осуществлено по створам водоемов (правый и левый берег, середина). Материалом для проведения исследований послужили пробы:

- воды истока р. Ангары. Отбор проб проведен ежемесячно в 2006-2008 гг. (правый берег) и с марта 2021 г. по февраль 2022 г. (правый и левый берега, середина).

- водной толщи Иркутского водохранилища. Отбор проб проведен в июле 2007 и 2012 гг., мае, июле и сентябре 2021 г. (15 станций).

- сточных вод промышленной зоны г. Усолье-Сибирское и вод р. Ангары на удалении (50 м, 1,5 и 5 км) от источника загрязнения (ежемесячно в 2006-2008 гг.). В 2008 г. осуществлен отбор сточных вод и отложений коллекторной сети предприятия «Усольехимпром»;

- водной толщи, поровых вод и донных отложений Братского водохранилища. Отбор проб воды проведен в верхней части водоема (9 станций) с 1999 по 2005 гг. и по всей акватории (38 станций) в период наибольшей (2001, 2003 гг.) и в период спада (2009, 2012, 2018 гг.) антропогенной нагрузки. Исследования гидрохимического состава 27 заливов водохранилища проведены в 2009 г. Отбор проб донных отложений осуществлен на 8 станциях, поровых вод донных отложений на 12 станциях. После отбора проб керны донных отложений поделены на слои, размер которых (от 2 см и выше) зависел от поставленных задач;

- водной толщи Усть-Илимского водохранилища в 2004 г. (45 станций). В 2017 г. опробованы воды р. Вихорева, водная толща, поровые воды и донные отложения Вихоревского залива (8 станций);

- водной толщи р. Ангары до зарегулирования Богучанской ГЭС (2007 г.) и Богучанского водохранилища в 2013, 2014 гг. (в период подъема уровня), в 2015, 2017 гг. (в период стабилизации уровня и становления водоема). В 2007, 2013, 2014 гг. отбор проб проведен в верхней части водоема (11 станций), в 2017 г. – по всей акватории водохранилища (17 станций).

Опробование, хранение и транспортировка проб воды и донных отложений проведены в соответствии с ГОСТ 17.1.5.04-81, ГОСТ 31861-2012, ГОСТ Р 59024-2020 и ГОСТ 17.1.5.01-80. Пробы водной толщи (поверхностной (0,5 м), придонной (1 м выше дна) и горизонтов между ними) отобраны с помощью батометра Ocean Test 110А, донных отложений и поровых вод – гравитационного пробоотборника (ГОИН). Пробы для определения концентраций микроэлементов после отбора профильтрованы через одноразовые мембранные фильтры (0,45 мкм). В соответствии с требованиями

методик измерений на месте отбора пробы воды законсервированы. Поровые воды из донных отложений извлечены путем центрифугирования образца с дальнейшей фильтрацией через мембранный фильтр (0,45 мкм).

Водородный показатель (рН), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и концентрация  $O_2$  в воде определены в полевых условиях. В пробах вод определены главные ионы ( $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ), биогенные компоненты ( $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ , Si), органическое вещество (ХПК, БПК<sub>5</sub>, Сорп), фенолы, нефтепродукты и микроэлементы (Al, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Hg и др.); в донных отложениях –  $Al_2O_3$ , CaO,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ , MnO, MgO,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ , Zn, As, Pb, Cu, Fe, Mn, Al, Сорп. Определение концентраций микроэлементов в воде выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, Hg – атомно-абсорбционным методом. Измерение концентраций  $HCO_3^-$  проведено титриметрическим,  $SO_4^{2-}$  – турбидиметрическим,  $Cl^-$  – меркуриметрическим,  $O_2$  – йодометрическим,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$  и Si – фотометрическими методами,  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  – методом атомно-абсорбционной спектрометрии,  $Na^+$  и  $K^+$  – методом эмиссионной спектрометрии, фенолов и нефтепродуктов – флуориметрическим методом. Определение элементов в донных отложениях выполнено методами рентгенофлуоресцентного и атомно-абсорбционного анализа.

Для определения форм миграции ртути проанализированы пробы нефилтрованной воды и воды, профильтрованной через фильтры с размерами пор 2-3 мкм и 0,45 мкм. При анализе отложений коллекторной сети, дренажной канавы и взвеси водостоков предприятия «Усольехимпром» пробы предварительно окислены «царской водкой» и  $HNO_{3\text{конц}}$ . Формы нахождения элементов в донных отложениях определены с помощью метода последовательной экстракции (Tessier et al., 1979; Кузнецов, Шимко, 1990), оптимизированного для измерения концентраций элементов атомно-абсорбционным методом (Пройдакова, 2009).

Для оценки качества вод проведен расчет однофакторного индекса загрязнения CF (Håkanson, 1980), индекса загрязнения Немерова NPI (Benhaddya et al., 2019), индекса нагрузки загрязнения PLI (Tomlinson et al., 1980).

### **Глава 3. Пространственно-временная динамика гидрохимического состава Ангарской системы**

#### *Исток р. Ангары*

В воде пелагиали оз. Байкал концентрации главных ионов стабильны как в сезонном, так и межгодовом аспекте и изменяются в пределах точности методов измерения (Вотинцев, 1961; Khodzher et al., 2017). Сравнение концентраций главных ионов и величины минерализации (TDS) в воде истока р. Ангары и оз. Байкал показали

близость их основного ионного состава (табл. 1). Однако, несмотря на незначительную межгодовую изменчивость (Глазунов, 1963, Вотинцев и др., 1975, Тарасова, Мещерякова, 1992, Шпейзер и др., 2000, Коваль и др., 2005, Гребенщикова и др., 2011, настоящее исследование), в истоке реки выявлены сезонные флуктуации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  (Глазунов, 1963, Коваль и др., 2005). Главным результатом исследований, проведенных с 1950 г. по 2022 гг., стал вывод о «наследовании» концентраций главных ионов в воде истока р. Ангары от вод оз. Байкал, что дает возможность использовать данные по гидрохимическому составу истока реки в качестве осредненной характеристики состава вод всего озера.

Таблица 1 – Средние концентрации (мг/л) компонентов основного ионного состава в воде оз. Байкал и Ангарской системы

	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	TDS
Оз. Байкал (Khodzher et al., 2017)	66,3	5,5	0,4	16,4	3,0	3,3	1,0	~ 96
Исток р. Ангары	65,6	5,2	0,7	15,3	3,0	3,2	0,9	94,8
Иркутское водохранилище	65,5	5,5	0,9	15,4	3,3	3,2	1,0	95,2
Братское водохранилище*	72,6	11,3	3,0	20,0	3,9	4,0	1,0	116,1
Усть-Илимское водохранилище*	90,6	14,6	7,5	22,2	5,7	8,3	1,2	151,9
Богучанское водохранилище	90,3	14,0	7,5	18,6	7,9	8,9	1,1	150,1

\* здесь и в табл. 2 средние концентрации для Братского водохранилища приведены без учета Окинской и Ийской частей, для Усть-Илимского водохранилища – Илимской части и Вихоревского залива

Концентрации большинства микроэлементов в воде всего озера и Среднего Байкала близки между собой (табл. 2). В воде Южного Байкала и истока р. Ангары концентрации микроэлементов, за исключением As и U, выше. Одной из причин такого распределения микроэлементов может быть особенность формирования водного баланса Южного Байкала. Глазуновым И.В. (1963) показано, что на его гидрохимический состав, в частности концентрацию  $\text{HCO}_3^-$ , большое влияние оказывают воды поступающей в него р. Селенги, которые благодаря мощному селенгинскому течению распространяются вдоль западного берега озера и поступают в р. Ангару. Воды р. Селенги и ее притоков обогащены Fe, Al, Zn, Pb, U и As (Касимов и др., 2016).

Изучение динамики микроэлементного состава вод по створу истока р. Ангары показало, что в пределах  $\pm 1$  стандартное отклонение (SD) находятся 35 (из 36) проб по концентрации Cd, 34 пробы по концентрации U, 33 пробы по концентрации

Tl, 28 и более проб по концентрации Al, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sn, Pb и Cs, 23 и более проб по концентрации Fe, Mn и Th. Такие показатели определяют высокую степень постоянства его микроэлементного состава. Повышенные (среднее $\pm$ 2, $\pm$ 3SD) концентрации микроэлементов в разные периоды опробования, помимо природной составляющей, отражают влияние антропогенно нагруженных территорий поселков Листвянка и Порт Байкал, а также эксплуатацию водного транспорта.

Таблица 2 – Концентрации микроэлементов (мкг/л) в воде оз. Байкал и Ангарской системы и их сравнение с нормативами качества вод

	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>
Оз. Байкал*	0,38	0,07	0,13	0,38	0,21	3,2
Средний Байкал*	0,34-1,15	0,07	0,09-0,33	0,26-1,12	0,16-0,25	0,24-0,56
Южный Байкал*	1,60-2,36	4,5-5,5	0,36-0,39	–	0,60-0,86	2,64-6,38
Исток р. Ангары	<u>2,56**</u>	<u>0,16</u>	<u>3,59</u>	<u>5,5</u>	<u>0,69</u>	<u>4,46</u>
	1,86	0,08	2,72	3,0	0,56	3,02
Иркутское вдхр.	4,60	0,10	7,02	12,1	0,55	4,21
Братское вдхр. (2003)	64,1	0,33	20,3	91,2	0,78	3,01
Братское вдхр. (2018)	14,6	0,20	23,9	23,6	0,89	3,85
Усть-Илимское вдхр.	8,4	0,27	36,3	8,8	0,76	1,98
Поверхностные воды мира*	32	0,7	34	66	1,48	0,60
ПДКпв*	100	50	100	300	1000	5000
ВНО*	150	50	100	300	70	3000
	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cs</b>	<b>Pb</b>	<b>U</b>	<b>Hg</b>
Оз. Байкал*	0,40	0,008	0,0013	<0,02	0,55	–
Средний Байкал*	0,40	0,008	0,0017	0,01-0,04	0,52	0,0009
Южный Байкал*	–	0,010-0,024	–	0,04-0,06	0,51-0,54	–
Исток р. Ангары	<u>0,41</u>	<u>0,026</u>	<u>0,0024</u>	<u>0,25</u>	<u>0,55</u>	<u>0,0010</u>
	0,40	0,022	0,0016	0,08	0,53	0,0009
Иркутское вдхр.	0,37	0,025	0,0034	0,23	0,50	0,0010
Братское вдхр. (2003)	0,41	0,089	0,0143	0,26	0,57	0,0088
Братское вдхр. (2018)	0,36	0,022	0,0022	0,15	0,52	0,0051
Усть-Илимское вдхр.	0,55	0,506	0,0035	0,44	0,57	0,0026
Поверхностные воды мира*	0,62	0,08	0,011	0,079	0,37	–
ПДКпв*	10	1	–	10	15	0,5
ВНО*	10	3	–	10	30	6

\* оз. Байкал (Ветров и др., 2013), Средний Байкал (ртуть (Ciesielski et al., 2016), остальные микроэлементы (Склярова, 2011)), Южный Байкал (Эпов и др., 2000), поверхностные воды мира (Gaillardet et al., 2004), ПДКпв (СанПиН, 2021), ВНО (ВНО, 2011); \*\* в числителе – среднее, в знаменателе – медиана.

### *Иркутское водохранилище*

Средняя величина минерализации вод Иркутского водохранилища близка к истоку р. Ангары (табл. 1), но по акватории водоема подвержена более значительным вариациям (78,5-104,0 мг/л). Вода характеризуется окислительными условиями (Eh от 153 до 170) и нейтральной, реже слабощелочной реакцией среды (pH от 7,4 до 8,3). Большинство концентрации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  изменяются в диапазоне среднее $\pm$ 2SD. В пределах  $\pm$ 3SD изменяются концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  в 3 (из 75) образцах,  $\text{Ca}^{2+}$  в 2 образцах,  $\text{Mg}^{2+}$  в 1 образце. Близкие концентрации главных ионов и TDS в водах оз. Байкал, истока р. Ангары и Иркутском водохранилище (табл. 1) определяют, что основным природным источником формирования гидрохимического состава водохранилища является сток озера.

Характерной особенностью микроэлементного состава водохранилища, также как и оз. Байкал, являются концентрации Zn и U, которые превышают среднее значение для поверхностных вод Мира (табл. 2) и, как показано в (Склярова, 2011), характеризуют геохимический фон озера. Порядок микроэлементов, построенных по убыванию средних концентраций, для вод Иркутского водохранилища ( $\text{Fe} > \text{Mn}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Zn} > \text{Cu}$ ,  $\text{U} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd}$ ,  $\text{Sn} > \text{Co} > \text{Cs} > \text{Th}$ ,  $\text{Hg}$ ) близок к водам истока р. Ангары. Ниже по течению от пос. Листвянка до плотины Иркутской ГЭС наиболее часто встречающиеся концентрации Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Cd, As, Th, Hg и U остаются на уровне, близком к концентрациям в воде истока р. Ангары. Также как в истоке р. Ангары, в воде водохранилища выделены локальные увеличения (среднее $\pm$ 2SD) концентраций микроэлементов: Zn и Sn в 12 (из 75), Pb в 11, Mn и Fe в 8, Al, Cu и Cs в 7, Cr и Co в 6, Th в 4, Cd в 3 пробах. При отсутствии значимых производств на побережье Иркутского водохранилища, воздействие на его микроэлементный состав связано с развитием на его побережье коттеджных поселений, инфраструктура которых зачастую не соответствует природоохраным нормативам, и водным транспортом. На распределение концентраций Al, Fe, Mn, Co и Th оказывают влияние процессы абразии берегов, активизировавшиеся после создания водохранилища.

### *Русловая часть Братского водохранилища*

Воды Братского водохранилища маломинерализованные (97,2-143,6 мг/л) с нейтральной или слабощелочной реакцией среды (pH от 7,6 до 8,7) и положительными значениями Eh (от 114 до 297). Концентрации главных ионов в воде превосходят таковые в воде оз. Байкал, истоке р. Ангары и Иркутском водохранилище (табл. 1). Увеличение концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ , связанное с распространением ниже г. Усолье-Сибирское (зона переменного подпора водохранилища) кембрийских отложений, отмечено на этом участке р. Ангары еще до создания водохранилища (Бочкарев, 1959). К главным техногенным источникам, определяющим увеличение в

воде этих компонентов, а также  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Si, относятся высокоминерализованные (до 16321 мг/л) сточные воды промышленной зоны г. Усолье-Сибирского. На участке водоема, непосредственно прилегающем к сточным водам, концентрации  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  в воде увеличиваются в десятки и сотни раз. Техногенные потоки загрязняющих веществ вытянуты вдоль линии левого берега и на расстоянии в 5 км ниже по течению от сточных вод снижаются, за исключением  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ , до концентраций, измеренных в р. Ангаре выше промышленной зоны. В центральной части и у правого берега влияние сточных вод на основной ионный состав минимально. Пространственное распределение главных ионов в воде показывает, что процессы разбавления играют важную роль в самоочищении водной среды.

Изучение пространственно-временной динамики микроэлементного состава водной толщи позволило выделить по акватории Братского водохранилища три участка. Участок I (от г. Усолье-Сибирское до д. Быково) находится под воздействием наиболее значительной техногенной нагрузки. В период работы предприятия «Усольехимпром» (2003 г.), поступление элементов с промышленной зоны г. Усолье-Сибирское отражается на повышении в воде концентраций Hg, Mn, Fe, Zn (рис. 2), а также Al, Cr, Cu, Cd, Cs, U. После его закрытия (2018 г.) техногенная эмиссия, хоть и в меньших количествах, продолжается. Негативное воздействие связано с высокозагрязненными производственными объектами, которые не ликвидированы после закрытия предприятия. Исследование миграционных особенностей главного для Братского водохранилища токсиканта, показало, что водоотводная система промышленной зоны г. Усолье-Сибирское заражена ртутью, основная масса которой переносится в магистралях в форме взвеси: около 30% ртути находится в форме нерастворимых сульфидов, 70% – способно переходить в растворенную форму в результате десорбции. В воде Братского водохранилища растворенные формы Hg не образуют протяженных потоков рассеяния благодаря адсорбции на взвеси и последующего выведения в аллювиальные отложения, что определяет снижение концентраций токсиканта в воде по мере удаления от источника загрязнения. Большое влияние на уменьшение концентраций микроэлементов, как и главных ионов, имеет смешение сточных вод с большим объемом вод русловой части водохранилища. В пределах I участка выделяется район г. Свирск (62 км) – о. Конный (72 км), где концентрации элементов в придонной воде, по сравнению с поверхностной, увеличиваются: Al, Cr, Mn, Fe, Cu, As, Cd, Cs, Pb, U в 2003 г., Al, Cr, Fe, Cu, Zn, Pb, Cs, U, Pb, Hg в 2018 г. (рис. 2).

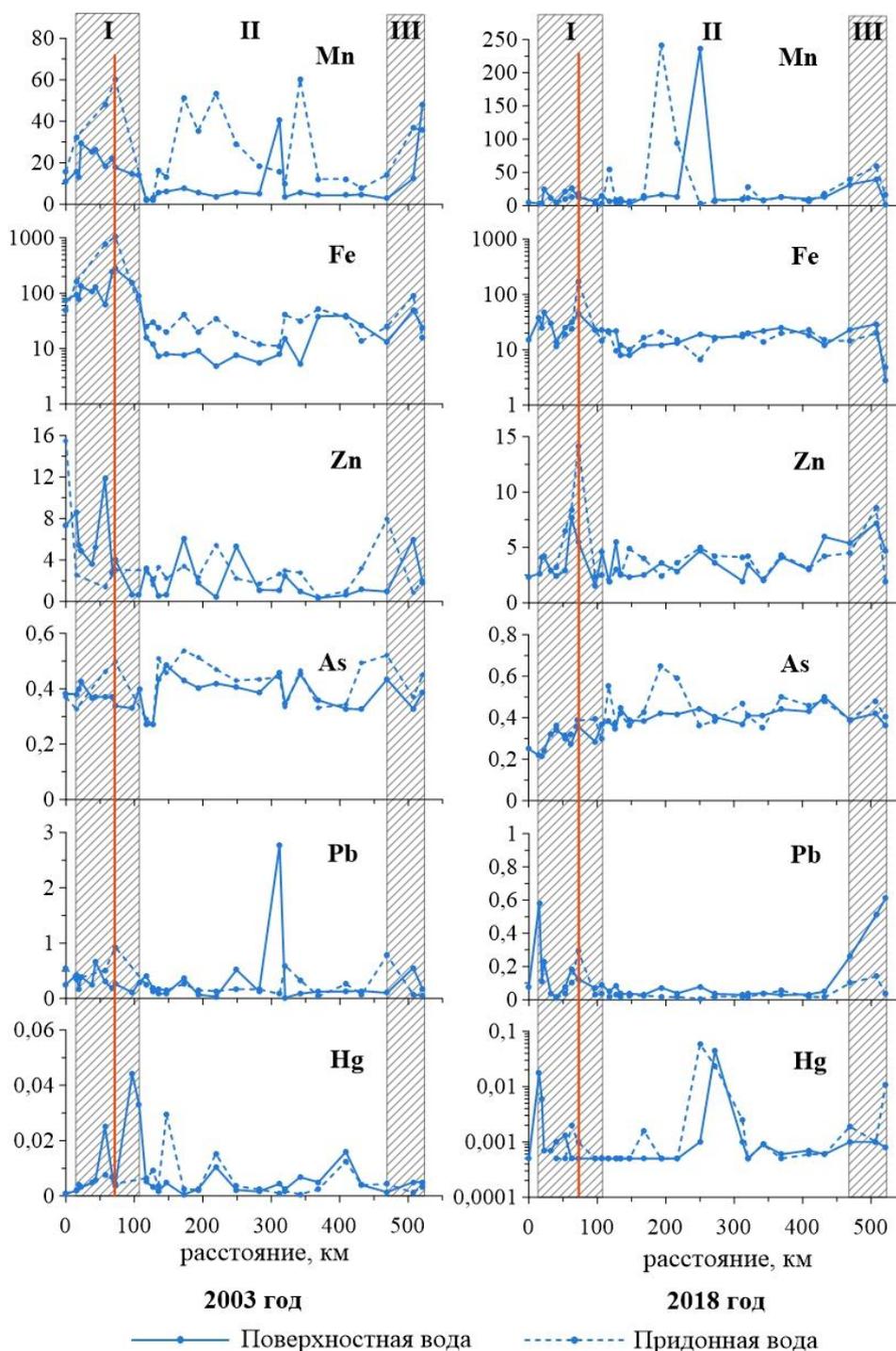


Рисунок 2 – Концентрации микроэлементов (мкг/л) в воде Братского водохранилища. I – участок (г. Усолье-Сибирское, 15 км – д. Быково, 107 км), II – участок (д. Быково, 107 км – д. Наратай, 469 км), III – участок (д. Наратай, 469 км – г. Братск, 524 км). Оранжевая линия – о. Конный (72 км)

Нагрузка на участок II (от д. Быково до д. Наратай) значительно меньше, т.к. на его побережье нет значимых источников загрязнения. В целом, концентрации микроэлементов в воде этого участка соизмеримы с их концентрациями в воде выше по течению от г. Усолье-Сибирское (рис. 2). В тоже время, в разные по антропогенной нагрузке периоды в воде участка II отмечаются локальные превышения концентраций микроэлементов, соизмеримые, с их концентрациями в воде наиболее загрязненного I участка. Такие аномалии отражают природную составляющую, связанную с внутриводоемными процессами (абразия берегов, поступление грунтовых вод и т.д.). На участке III (от д. Наратай до г. Братск) повышенные концентрации Mn, Cu, Zn, Pb

в 2003 г. и Cr, Zn, Cd, Pb, Hg в 2018 г. связано с промышленной зоной г. Братск, поступление загрязняющих веществ с которой осуществляется, в основном, с атмосферным переносом. В атмосферном воздухе г. Братск обнаружены значительные концентрации Pb, Zn, Cd и Cu (Игнатьева и др., 2005), а в снеговой воде – концентрации Al, Zn, Cd, Pb (Янченко, Яскина, 2010).

#### *Заливы Братского водохранилища*

Средняя величина минерализации в заливах Ангарской части водохранилища составляет 124 мг/л, Окинской части – 107 мг/л, Ийской части – 89 мг/л. pH вод изменяется от 6,1 до 8,8, Eh – от 164 до 303 мВ. Несмотря на большие объемы накопленных на дне заливов древесных остатков, деструкция которых приводит к ухудшению кислородного режима вод, поверхностные и придонные воды большинства заливов содержат количество O<sub>2</sub> (6,1-10,2 мг/л), достаточное для удовлетворительного существования гидробионтов. В большинстве заливов прослеживается увеличение с глубиной концентраций NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (рис. 3), а также PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> и Si, в то время как для NO<sub>2</sub><sup>-</sup> наблюдается обратная закономерность. В водах заливов Окинской и Ийской частей концентрации неорганического азота, особенно NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, а также фенолов и Si заметно выше, чем в Ангарской части. Такие различия, связаны с водным режимом заливов (температура, глубина, проточность и т.д.), и интенсивностью развития планктонных водорослей. Результаты распределения Сорг (от 1,5 до 8,9 мг/л) и биогенных компонентов в водной толще, а также микробиологические исследования (Полетаева, Пастухов, 2015), показывают, что поступающие в водоем загрязняющие вещества, в большинстве случаев, выводятся из водной среды благодаря биохимическим процессам самоочищения. Выделены заливы, в наибольшей степени подверженные воздействию лесозаготовительной деятельности: Тарей, Травкина Баля, Баля, Тарей и Сухой Лог (Ангарская часть), Индобь и Аобь (Окинская часть), Худобка, Кантин и Добчур (Ийская часть).

#### *Усть-Илимское водохранилище*

При изучении гидрохимического состава по акватории Усть-Илимского водохранилища выделено пять участков, различающихся по гидрологическим характеристикам и антропогенной нагрузке (I – от плотины Братской ГЭС до пос. Дубынино, II – от пос. Дубынино до пос. Седаново, III – от пос. Седаново до устья Илимской части, IV – от устья Илимской части до плотины Усть-Илимской ГЭС, V – Илимская часть) и наиболее техногенно нагруженный Вихоревский залив.

В маломинерализованных (130,4-194,7,3 мг/л) водах I-V участков величина pH изменялась от 7,1 до 8,2, Eh – от 164 до 303 мВ, концентрация кислорода – от 8,4 мг/л до 11,9 мг/л. Исключением являются придонные воды IV и V участков, в которых наблюдается увеличение TDS (до 359,3 мг/л) и снижение концентраций O<sub>2</sub> (до 0,9

мг/л). Такие показатели близки к Вихоревскому заливу (TDS – до 432,6 мг/л,  $O_2$  – до 0,6 мг/л), который принимает на себя основную техногенную нагрузку.

В пределах каждого участка Усть-Илимского водохранилища концентрации главных ионов и микроэлементов (рис. 4) подвержены различным вариациям. Негативное влияние промышленной зоны г. Братск выделено уже на I участке, в воде которого на прибрежных станциях нижнего бьефа Братской ГЭС отмечено увеличение концентраций Al, Zn, Cd, Pb. Как и следовало ожидать, влияние лесоперерабатывающей промышленности отражается на увеличении концентраций характерных загрязняющих веществ –  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$  и  $Cl^-$  в воде р. Вихорева и Вихоревского залива. Значительное повышение концентраций Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr и Pb в воде р. Вихорева после поступления сточных вод показывает, что концентрации этих микроэлементов также имеют техногенное происхождение.

Изучение распределения главных ионов в водной толще Вихоревского залива (2017 г.) показало, что их концентрации в поверхностных водах выше, чем в придонных. Такая неоднородность, определенная и в период становления водохранилища (Стрижова, 1985), связана с ограничением возможности быстрого смешения двух потоков с высокой разностью температур: более холодные воды Усть-Илимского водохранилища, и воды р. Вихорева, подогретые сточными водами. Концентрации микроэлементов, напротив, в поверхностных водах залива близки к таковым в русловой части водохранилища, в придонных водах – значительно выше.

Последовательное снижение концентраций элементов антропогенного происхождения в Вихоревском заливе после поступления р. Вихорева и ниже устья залива (II участок), в первую очередь, связано с разбавлением загрязненных вод большим объемом русловых вод водохранилища. Особенностью гидрохимического

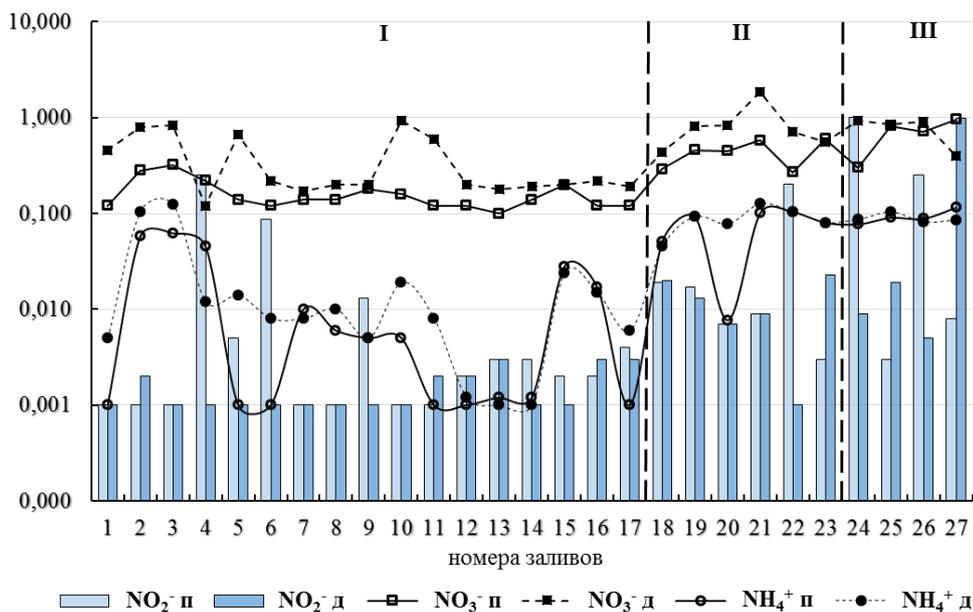


Рисунок 3 – Концентрация минеральных форм азота (мг/л) в поверхностных (П) и придонных (Д) водах заливов Братского водохранилища. I – заливы Ангарской части, II – заливы Окинской части, III – заливы Ийской части.

состава придонных вод III-V участков является повышение, относительно средних по водохранилищу (табл. 1, 2), концентрации  $SO_4^{2-}$  (до 26,9 мг/л),  $Na^+$  (до 26,3 мг/л) и  $Cl^-$  (до 42,1 мг/л), а также Mn (до 275,4 мкг/л), Fe (до 22,5 мг/л), Zn (до 5,5 мкг/л), Al (до 30,7 мкг/л), Ti (до 2,7 мкг/л), As (до 1,3 мкг/л), Pb (до 1,1 мкг/л), Cd (до 2,3 мкг/л) и т.д. Миграционные характеристики  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , определяют, что при  $pH > 6$  они должны осаждаться в виде трудно растворимых гидроксидов, карбонатов и т.д. и накапливаться в донных отложениях. Очень низкая подвижность в околонеutralной, окислительной среде характерна и для Mn, Fe и Al. Выделенные свойства элементов должны препятствовать значительному их распространению от источников поступления. В связи с этим, выдвинуто предположение, что локальные повышения концентраций элементов в придонных водах III-V участков, в меньшей степени подверженных антропогенной нагрузке, могут нести информацию о природных источниках их поступления.

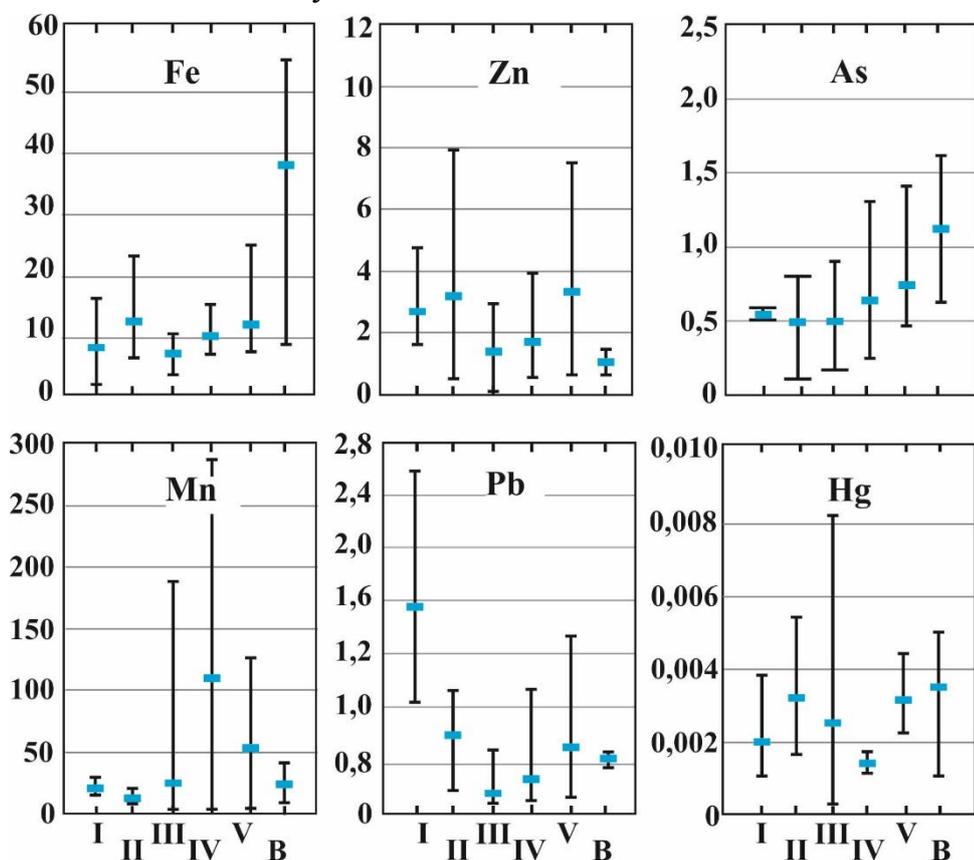


Рисунок 4 – Пределы (усы) и средние (синий прямоугольник) концентрации микроэлементов (мкг/л) в воде Ангарской части (I, II, III, IV участки), Илимской части (V участок) и Вихоревского залива (VI) Усть-Илимского водохранилища (2004 г)

При различном спектре элементов, повышающихся на отдельных станциях наблюдения, наиболее часто встречаемыми являются Mn, Al и Fe, устойчивое накопление концентраций которых в придонной воде свидетельствует об обогащенности этими элементами водовмещающих пород. Выделение субаквальной разгрузки подземных вод, как источника поступления элементов, осуществлено путем сопоставления гидрохимического состава придонных вод с картой тектонических нарушений в бассейне водохранилища и результатами гидрогеологических

исследований (Усть-Илимское ..., 1975). С инфильтрацией грунтовых вод в пределах тектонически ослабленных зон и наличием депрессионно-купольного строения поверхности уровня подземных вод связано увеличение концентраций  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Mn}$  в придонных водах IV и V участков. Особенностью для вод верхнего бьефа Усть-Илимской ГЭС (IV участок) является стратификация главных ионов в водной толще. В слое от 0 до 40 м их концентрации близки между собой (TDS 123,9-135,3 мг/л) и отражают сток оз. Байкал, трансформированный в Иркутском, Братском водохранилищах и верхней части Усть-Илимского водохранилища. На глубинах от 40 до 100 м концентрации главных ионов, особенно  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , повышаются (TDS до 359,3 мг/л), определяя подток высокоминерализованных подземных вод  $\text{Cl-Na}$  состава.

Увеличение концентраций  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и, одновременно,  $\text{Mn}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$  в придонных водах III участка могут отражать поступление подземных вод первого от поверхности водоносного горизонта, представленного гидрокарбонатными щелочноземельными водами с повышенными концентрациями  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ . С точки зрения субаквальной разгрузки подземных вод можно объяснить увеличение концентраций  $\text{Zn}$  (4,7 мкг/л) и  $\text{Pb}$  (2,6 мкг/л) в воде I участка около д. Дубынино. Высокие концентрации этих элементов в подземных водах определены в зонах экзоконтактов траппов с отложениями нижней подсвиты мамырской свиты, характеризующихся трещиноватостью и связанной с ней повышенной водообильностью (Усть-Илимское..., 1975). Представляет интерес последовательное увеличение концентраций  $\text{Hg}$  и  $\text{As}$  по течению р. Вихорева после поступления в нее сточных вод и далее в Вихоревском заливе. Концентрации  $\text{Hg}$  и  $\text{As}$  в подземных водах определены не были, однако, известно, что общегеологические закономерности района благоприятны для локализации рудопроявлений ртути. Повышенные концентрации этих элементов в воде р. Вихорева и Вихоревского залива могут быть связаны с поступлением подземных вод, приуроченных к зоне разлома, трассирующего русло реки. Общим для выделенных потенциальных источников поступления элементов является их локальное действие, вследствие небольших дебитов.

#### *Р. Ангара и Богучанское водохранилище*

В воде незарегулированной р. Ангары (2007 г.) и Богучанском водохранилище в стадии подъема уровня (2013, 2014 гг.) величина рН в воде изменялась от 7,3 до 8,3. В 2015, 2017 гг. в районах затопленных сельскохозяйственных угодий щелочность увеличилась в придонных слоях воды. В воде р. Ангары распределение главных ионов и величины минерализации (140,7-154,6 мг/л) достаточно равномерно. В воде Богучанского водохранилища определена временная (рис. 5) и пространственная динамика концентраций главных ионов. TDS вод в 2017 г. – 139,1-172,3 мг/л.

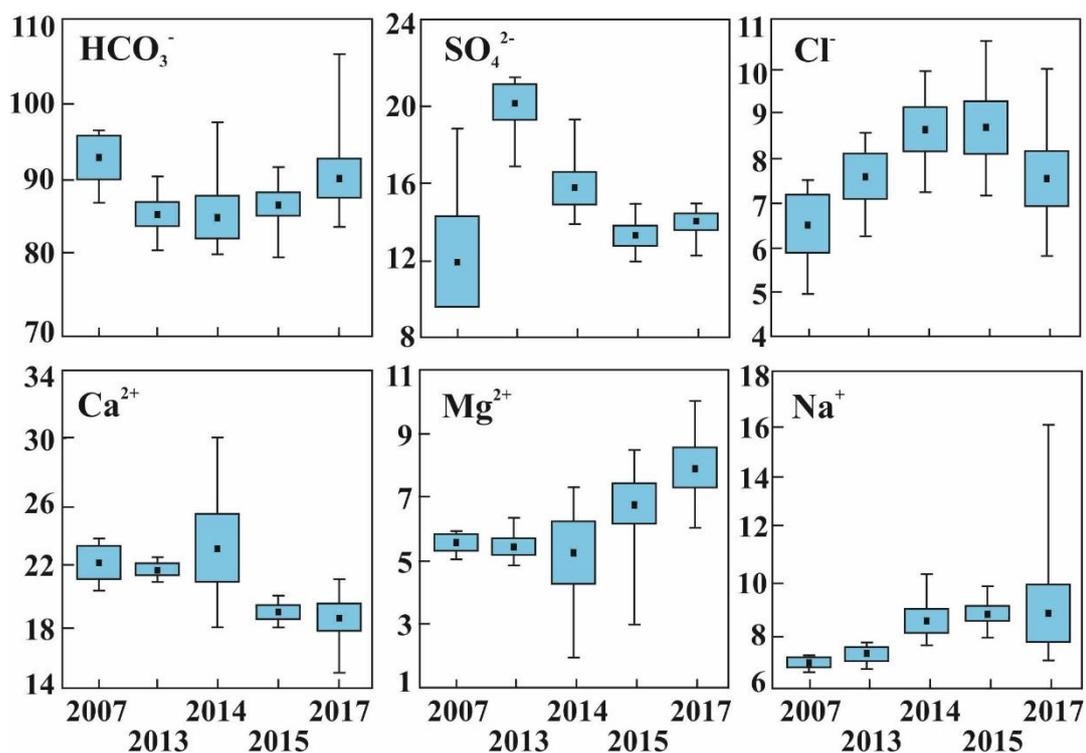


Рисунок 5 – Концентрация главных ионов (мг/л) в воде мониторинговых станций р. Ангары (2007 г.) и Богучанского водохранилища (2013-2017 гг.). Прямоугольник – стандартная ошибка, точка в прямоугольнике – среднее значение, усы – максимальное и минимальное значение.

Результаты исследования показали, что тенденция доминирования анионов в воде оз. Байкал, истока р. Ангары, Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ сохраняется и в Богучанском водохранилище:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ . При общей закономерности в распределении катионов ( $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ) в воде озера и вышерасположенных водохранилищах, в Богучанском водохранилище ведущим катионом остается  $\text{Ca}^{2+}$ , а концентрации  $\text{Na}^+$ , в большинстве проб воды, становятся больше  $\text{Mg}^{2+}$ . Такая закономерность связана с поступающими на входной створ водохранилища через плотину Усть-Илимской ГЭС водами, насыщенными компонентами рассолов (см. выше). На основной ионный состав русловой части Богучанского водохранилища боковой приток не оказывает значительного влияния. Исключением являются придонные воды нижней части водоема, в которых увеличение концентраций  $\text{HCO}_3^-$ , связано с поступлением более минерализованных вод р. Кова.

К антропогенным источникам для Богучанского водохранилища относятся сточные воды Усть-Илимского лесопромышленного комплекса, показателем поступления которых является локальное увеличение концентраций  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в верхней части водоема. Немаловажным фактором, повлиявшим на режим главных ионов, стало само зарегулирование реки. Так, на концентрацию  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ , а также  $\text{Mg}^{2+}$  влияет активизация в приурезовой зоне процессов выветривания пород,

распространенных в пределах его водосбора – карбонаты (доломиты, известняки) и обогащенные карбонатами силикаты (Богучанское водохранилище..., 1979). Для выявления общего характера поведения компонентов рассчитаны коэффициенты парной корреляции, выявившие ожидаемую взаимосвязь  $\text{Ca}^{2+}$  с  $\text{HCO}_3^-$  ( $r=0,57$ ,  $p<0,01$ ) в р. Ангаре до зарегулирования. Результаты корреляционного анализа для вод водохранилища существенно отличаются: в 2013 г. выделены  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$  ( $r=0,87$ ,  $p<0,01$ ), в 2014 г. –  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Na}^+$  ( $r=0,79-87$ ,  $p<0,01$ ),  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$  ( $r=0,63$ ,  $p<0,05$ ), в 2015 г. –  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+$  ( $r=0,65$ ,  $p<0,01$ ),  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$  ( $r=0,92$ ,  $p<0,01$ ), в 2017 г. –  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+$  ( $r=0,89$ ,  $p<0,01$ ),  $\text{Cl}^-$ - $\text{Mg}^+$  ( $r=0,64$ ,  $p<0,01$ ). Известно, что фактором, определяющим вариации главных ионов в период заполнения и стабилизации водохранилища, является изменение гидрогеохимических условий (Wildi, 2010; Bahir et al., 2019). Так, в зоне подпора Братского водохранилища при увеличении уровня воды произошло внедрение высокоминерализованных вод глубокой циркуляции, повысив концентрацию  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  в водной толще (Овчинников и др., 1999). Результаты гидрогеологической съемки (Богучанское водохранилище..., 1979) показали, что в верхней части бассейна Богучанского водохранилища грунтовые воды, тесно связанные с наличием тектонических разломов и зоной повышенной трещиноватости,  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}$  или  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Mg}$ , напорные воды –  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}$ , сменяющиеся вниз по разрезу на  $\text{SO}_4$ - $\text{Cl}$ - $\text{Na}$  или  $\text{Cl}$ - $\text{Na}$ . До зарегулирования р. Ангары соленые хлоридные воды выходили на побережье в виде источников (до 150 л/с). Последовательное поступление подземных вод различных горизонтов в верхнюю часть разреза объясняет резкое увеличение концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$  в 2013 г. в воде Богучанского водохранилища с последующим их снижением, увеличение  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  на протяжении всего периода заполнения водохранилища (рис. 5), а также выделенный по корреляционным зависимостям общий характер поступления  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$ , изменяющийся в межгодовом аспекте.

Содержание  $\text{O}_2$  в воде р. Ангары до зарегулирования (9,7-11,6 мг/л) и в верхней части Богучанского водохранилища в период заполнения (7,9-11,9 мг/л) показывает, что дефицита кислорода, характерного для большинства создаваемых водохранилищ, не наблюдается. В период заполнения концентрации  $\text{NO}_3^-$  уменьшаются (в 2007 г. – 0,24-0,39 мг/л, в 2013-2014 гг. – <0,10-0,20 мг/л). Вместе с этим, в обогащенных  $\text{O}_2$  водах нитрат-ион, в большинстве проб, является преобладающим. При невысоких (в среднем 0,05-0,06 мг/л) концентрациях  $\text{NO}_2^-$ , его превышение над  $\text{NO}_3^-$  зафиксировано в зоне подпора, смещающейся в период заполнения водохранилища, что связано с увеличением площадей затопляемых территорий. При концентрациях  $\text{NH}_4^+<0,05$  мг/л в р. Ангаре и Богучанском водохранилище в 2013-2014 гг., в 2015 г. его концентрации возрастают (до 0,136 мг/л). На концентрацию фосфора (0,044 мг/л) в береговой части р. Ангары оказывала влияние р. Невонка, в которую поступали неочищенные

канализационные стоки пос. Невон. После зарегулирования реки повышение концентраций  $\text{PO}_4^{3-}$  (до 0,067 мг/л) зафиксировано только в 2015 г., когда в связи с изменением температуры воды в водохранилище увеличилось развитие планктонных водорослей.

#### Глава 4. Факторы, определяющие миграционные потоки элементов, и процессы самоочищения в пресноводной системе

*Донные отложения, как накопитель элементов антропогенного происхождения, и основной седиментационный геохимический барьер Братского водохранилища*

Как показано выше, на I участке Братского водохранилища выделяется район г. Свирск – о. Конный, в воде которого, при удалении от промышленной зоны г. Усолье-Сибирское и снижении техногенной нагрузки, концентрации широкого круга микроэлементов в придонной воде выше, чем в поверхностной. Результаты химического анализа показали, что в донных отложениях района г. Свирск также повышены концентрации Pb и As (рис. 6). Наибольший вклад в загрязнение этими элементами почвенного покрова побережья водоема внес Ангарский металлургический завод (г. Свирск) (Belogolova et al., 2019; Баенгуев и др., 2023). Изучение снегового покрова показало, что ореолы загрязнения приурочены к отвалам завода, с тенденцией распространения токсикантов по долине р. Ангары (Kholodova et al., 2019). В твердом осадке снега обнаружены фрагменты зерен эвхроита ( $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4) \cdot \text{OH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), которые считают индикаторами мышьяковистых отвалов (Холодова и др., 2016).

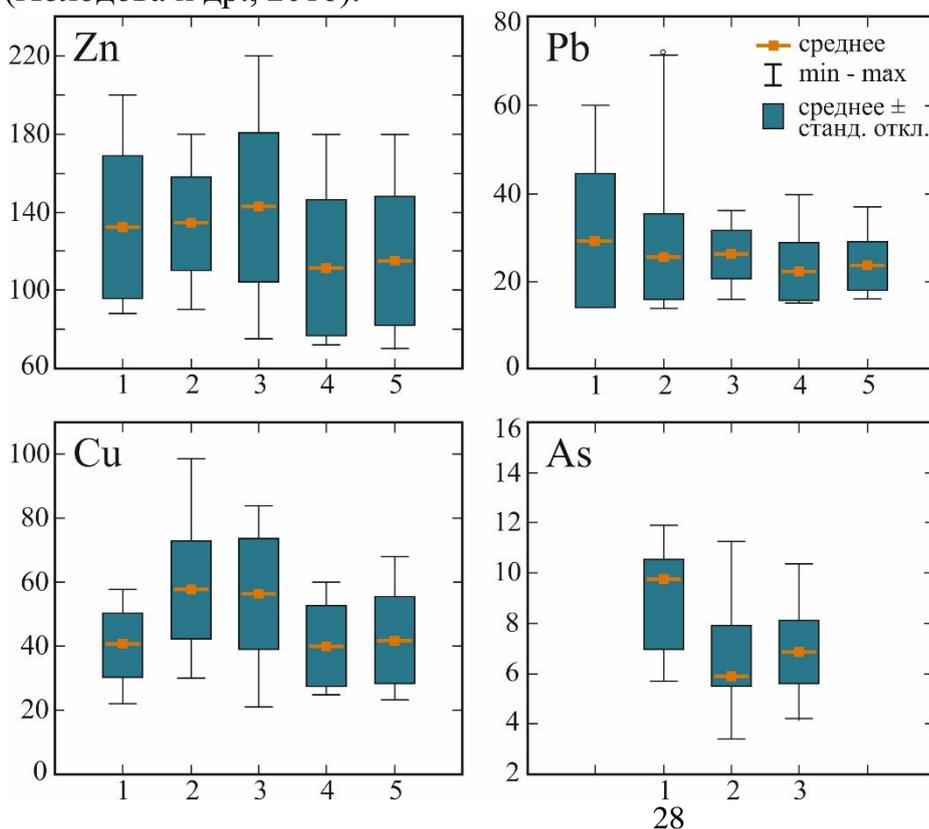


Рисунок 6 – Концентрации Zn, Pb, Cu, As (мг/кг) в донных отложениях верхней части Братского водохранилища.  
1 – г. Свирск,  
2 – о. Конный,  
3 – д. Середкино,  
4 – междуречье зал. Оса и Унга,  
5 – д. Молька.

Пространственное распределение Hg в донных отложениях верхней части Братского водохранилища показало, что в районе о. Конный происходит закрепление токсиканта, переносящегося в составе взвеси от промышленных зон г. Усолье-Сибирское (Алиева (Полетаева) и др., 2011; Pastukhov et al., 2019). Помимо Hg, в этом районе зафиксированы повышенные концентрации Pb, Cu и As. Ранее показано, что зарегулирование р. Ангары при создании Братского водохранилища привело к значительному изменению седиментационных характеристик (Овчинников и др., 1985). В области переменного и постоянного подпора образовалась зона, на которой в результате изменения скоростного режима и падения транспортирующей способности водного потока происходит механическое осаждение взвешенных веществ и активное накопление (около 60 % от поступающего) осадочного материала (Карнаухова, 2007). Результаты профильного опробования донных осадков в пределах выделенной зоны показали, что наибольшая скорость седиментации наблюдается на участке, приуроченном к верхней оконечности о. Конный, где мощность донных отложений составляет более 90 см (рис. 7). Учитывая классификации Перельмана А.И. (1979) и Глазковской М.А. (1981), этот участок отнесен к основному седиментационному геохимическому барьеру Братского водохранилища.

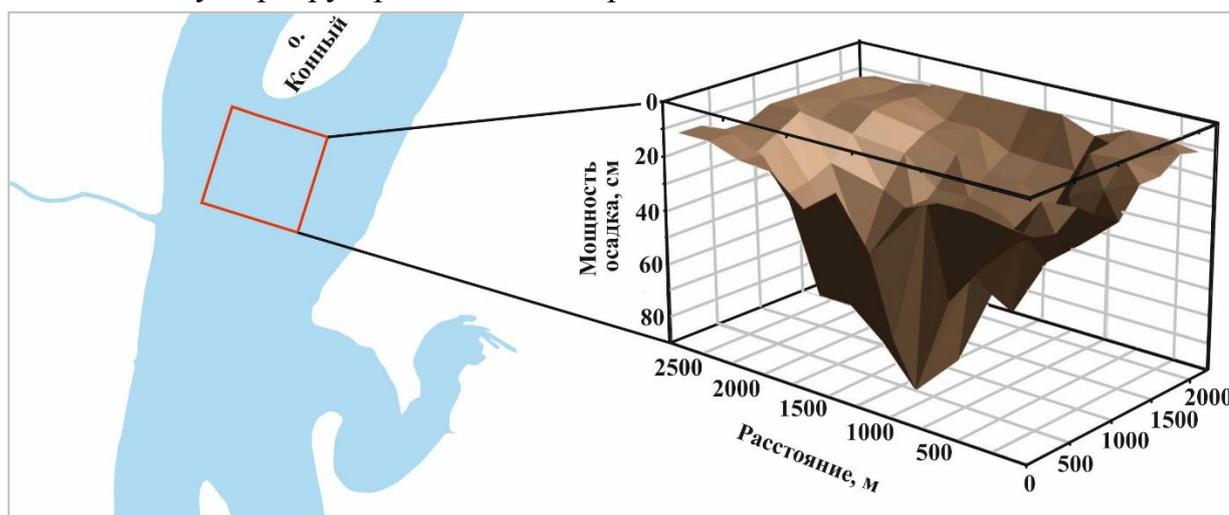


Рисунок 7 – Накопление донных отложений в районе о. Конный

Геохимическую роль донных отложений основного седиментационного барьера в выведении из водной среды элементов антропогенного происхождения наглядно показывает ретроспективная оценка накопления элементов (рис. 8). Выявлено, что основной закономерностью этого процесса является приуроченность высоких концентраций элементов к средним и нижним слоям донных отложений, образованным в период наибольшей техногенной эмиссии. После снижения техногенной нагрузки от промышленных зон г. Усолье-Сибирское и г. Свирск наблюдается тенденция уменьшения концентраций элементов в верхних слоях осадка, которая позволяет говорить о «захоронении» вещества антропогенного происхождения.

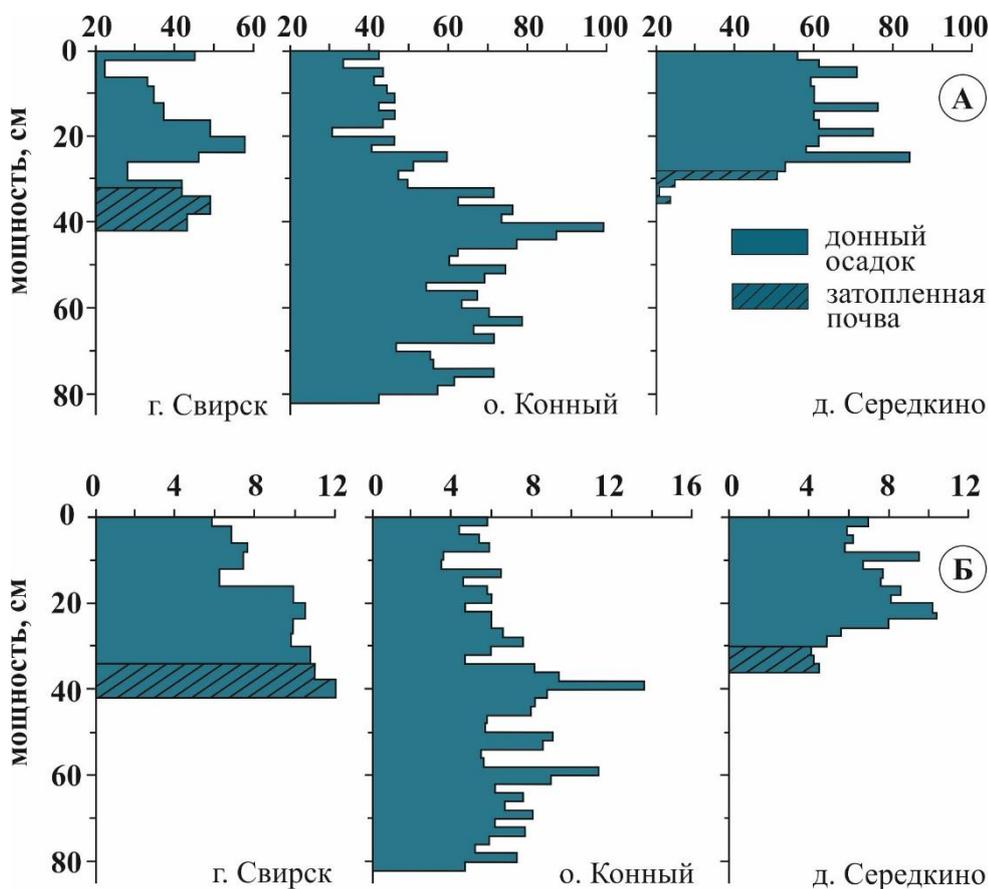


Рисунок 8 –  
Распределение меди (А) и мышьяка (Б) по глубине донных осадков Братского водохранилища

Геоэкологическая постановка вопроса определения форм нахождения элементов заключается в изучении перераспределения элементов в сопряженных средах «вода – донные отложения». Для Братского водохранилища наблюдается сорбция растворенных форм элементов взвешенным материалом, переносимого водной средой, и их седиментация (отражает состав донных осадков в районе г. Свирск и о. Конный). Далее, происходит десорбция элементов из донных осадков в воду (отражает увеличение концентраций элементов в придонной воде в районе г. Свирск и о. Конный). Результаты химического фракционирования элементов в донных отложениях (рис. 9) показали, что Fe, Al и Pb относятся к наиболее закрепленным (сумма прочносвязанных фракций 75-98%). Потенциально подвижными можно считать Zn, As и Cu (сумма водорастворимой, легкообменной, карбонатной, органической фракций и фракции амфотерных гидроксидов достигает 26%, 22% и 47%, соответственно), к увеличению миграционной активности которых может привести смена внешних или внутренних условий, в частности уровня воды, pH и Eh среды. К наиболее подвижным относятся Cd и Mn (сумма водорастворимой и легкообменной фракций достигает 31% и 27%, соответственно), по формам нахождения которых можно говорить о переходе этих элементов из донных отложений в водную среду. Необходимо отметить, что ниже по течению от выделенного геохимического барьера соотношение фракций меняется в сторону увеличения закрепленных (рис. 9). С позиций эволюции водоема такое распределение

форм нахождения элементов усиливает роль барьера, с одной стороны, как основного фактора, определяющего самоочищение водной среды, с другой стороны, как потенциального источника пролонгированного действия на водную среду.

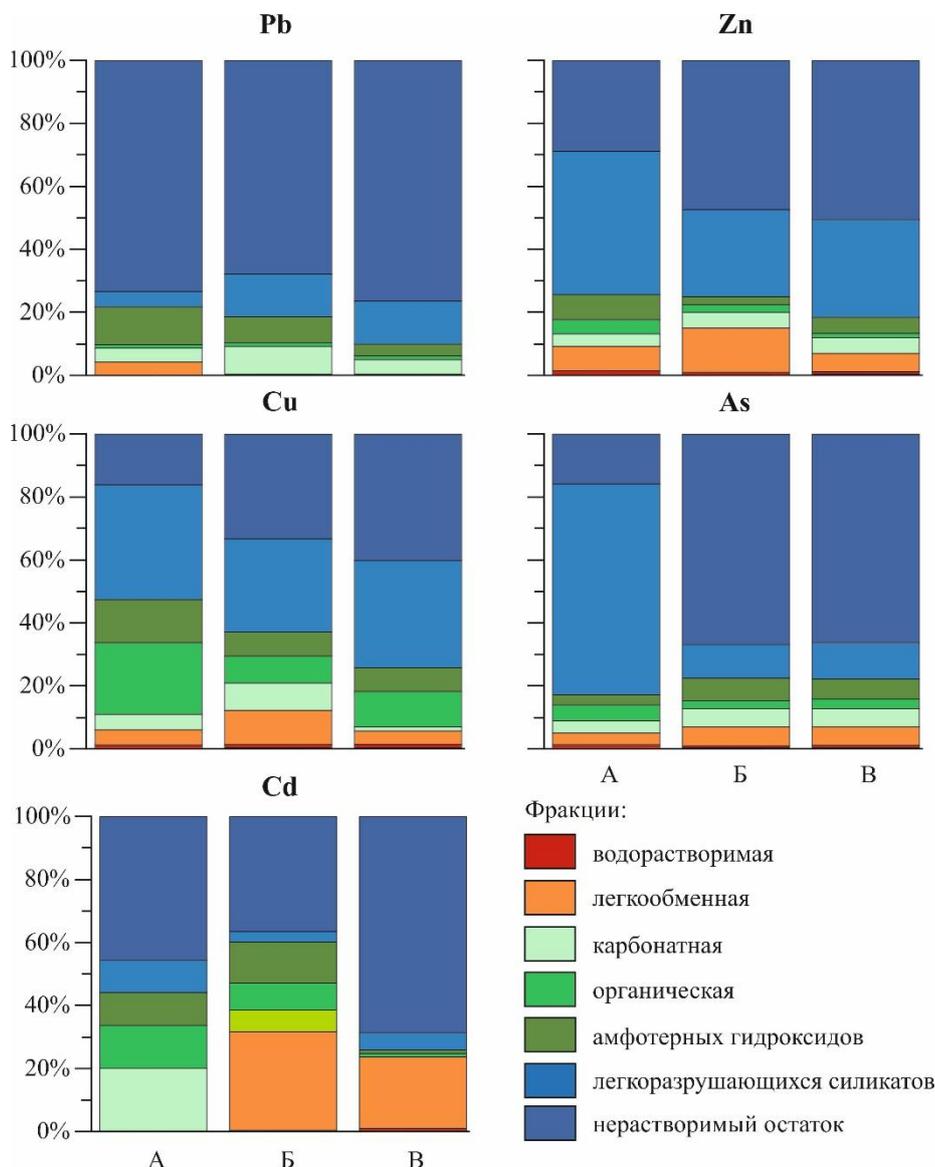


Рисунок 9 – Распределение концентраций элементов по фракциям (% от суммы фракций) в донных отложениях (среднее по 6 проанализированным слоям) Братского водохранилища. А – выше основного седиментационного барьера (г. Свирск), Б – основной седиментационный геохимический барьер (о. Конный), В – ниже основного седиментационного барьера (д. Середкино)

*Преобразование вещества в сопряженных средах «водная толща–поровая вода–донные отложения» и седиментационный геохимический барьер «приток–залив водохранилища» Усть-Илимского водохранилища*

Сточные воды, содержащие огромные количества растворенных (в том числе, сульфат-ионы, ионы хлора и натрия) и взвешенных (остатки древесного волокна, хлопья, слизь и другие плавающие примеси) веществ, поступали в р. Вихорева еще до зарегулирования р. Ангары плотиной Усть-Илимской ГЭС (Стрижова, 1985). Зона распространения загрязненных вод по р. Ангаре сохранялась до д. Ершово (135 км от устья р. Вихорева). При создании Усть-Илимского водохранилища водная система «приток – основная река» трансформирована в «приток водохранилища (р. Вихорева)

– залив водохранилища (Вихоревский залив)». В настоящее время значительное уменьшение, по сравнению с рекой, концентраций элементов наблюдается уже в Вихоревском заливе. Влияние загрязненной реки на русловую часть отмечено по левому берегу в 2,5 км ниже Вихоревского залива (Долгих и др., 2024).

Изменение гидрологических параметров (интенсивность водообмена, глубина, скорость течения и т.д.) в пограничной зоне слияния двух водных потоков после создания водохранилища отразилось на миграционных характеристиках веществ: произошла смена форм их переноса от транзита к аккумуляции. На участке смешения загрязненных вод реки и Вихоревского залива в условиях замедления водообмена сформировался седиментационный геохимический барьер. Результаты профильного опробования донных отложений залива показали максимальную (более 100 см) мощность донных отложений на участке в 2 км ниже устья р. Вихорева. Терригенный материал, поступающий с поверхностным стоком, затопленная древесная растительность и, в большей степени, промышленные взвеси образовали в Вихоревском заливе техногенные донные отложения, представляющие собой темно-серые, почти черные вязкие илы с сильным запахом гнили и сероводорода.

Изучение химического состава сопряженных сред «водная толща – поровая вода – донные отложения» показали направленность процессов, происходящих в условиях геохимической барьерной зоны. Показателем поступления значительных количеств органических веществ является увеличение концентрации Сор<sub>г</sub> (с 48 мг/л до 368 мг/л) в воде р. Вихорева после поступления сточных вод. В воде Вихоревского залива его концентрации снижаются (7-27 мг/л). Накопление органики в Вихоревском заливе показывают концентрации Сор<sub>г</sub> в донных отложениях (до 24 %) и поровых водах (до 875 мг/л). Эмиссия поллютантов определяет и недостаток O<sub>2</sub> в воде р. Вихорева ниже поступления сточных вод (до 0,3 мг/л). В поверхностных водах Вихоревского залива кислородный режим улучшается (6,0-10,0 мг/л). Дефицит растворенного кислорода (до 0,6 мг/л) в придонных водах залива является индикатором процессов деструкции накопленных в донных отложениях веществ техногенного происхождения. Верхний слой (около 1 см) донных отложений барьерной зоны имеет коричневатый цвет. Здесь в контакте с кислородсодержащей водной средой происходит смена окислительно-восстановительных условий. Темно-серый, почти черный цвет нижележащих слоев донных осадков показывает, что аэробные условия сменяются на анаэробные.

В устье р. Вихорева воды Cl-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Na с TDS 982 мг/л, в устье Вихоревского залива – HCO<sub>3</sub>-Ca с TDS в поверхностной воде 215,6 мг/л, в придонной 136,2 мг/л. Смешение двух водных потоков приводит к образованию SO<sub>4</sub>-Cl-HCO<sub>3</sub>-Ca-Na вод с TDS от 257 до 488 мг/л и околонеutralной реакцией среды (от 7,20 до 7,85). Минерализация поровых вод залива (884-1500 мг/л) увеличивается с глубиной донных

отложений. Сдвиг Eh в сторону отрицательных значений (от -189 до -293 mV) определяет диагенетические изменения, обусловленные разложением органического вещества. Состав поровых вод – гидрокарбонатный с переменными катионами, реакция среды околонейтральная (рН 7,21-7,52). Деструкцию органического вещества отражает увеличение концентраций  $\text{HCO}_3^-$  в поровых водах по глубине донных отложений. На проходящие в донных осадках процессы восстановления  $\text{SO}_4^{2-}$  указывает появление в придонных водах барьера  $\text{H}_2\text{S}$  (0,05 мг/л).

Наибольшие различия между концентрациями микроэлементов в придонных и поверхностных водах определены на участке седиментационного геохимического барьера (рис. 10), в донных отложениях которого выделена геохимическая аномалия (Poletaeva et al., 2019). По величинам коэффициента концентрации выстроен ряд элементов, содержание которых превышает медианные по всему водоему значения (по убывающей): Cd, Hg, Zn, Mn, Cr, Pb, Cu, Co, As, Fe. При этом, в барьерной зоне доли подвижных (водорастворимая, легкообменная) и потенциальных подвижных (карбонатная, органическая, аморфных гидроксидов) форм элементов в донных отложениях значительно выше, а закрепленных форм (легкоразрушающихся и труднорастворимых силикатов) ниже, чем в устье Вихоревского залива.

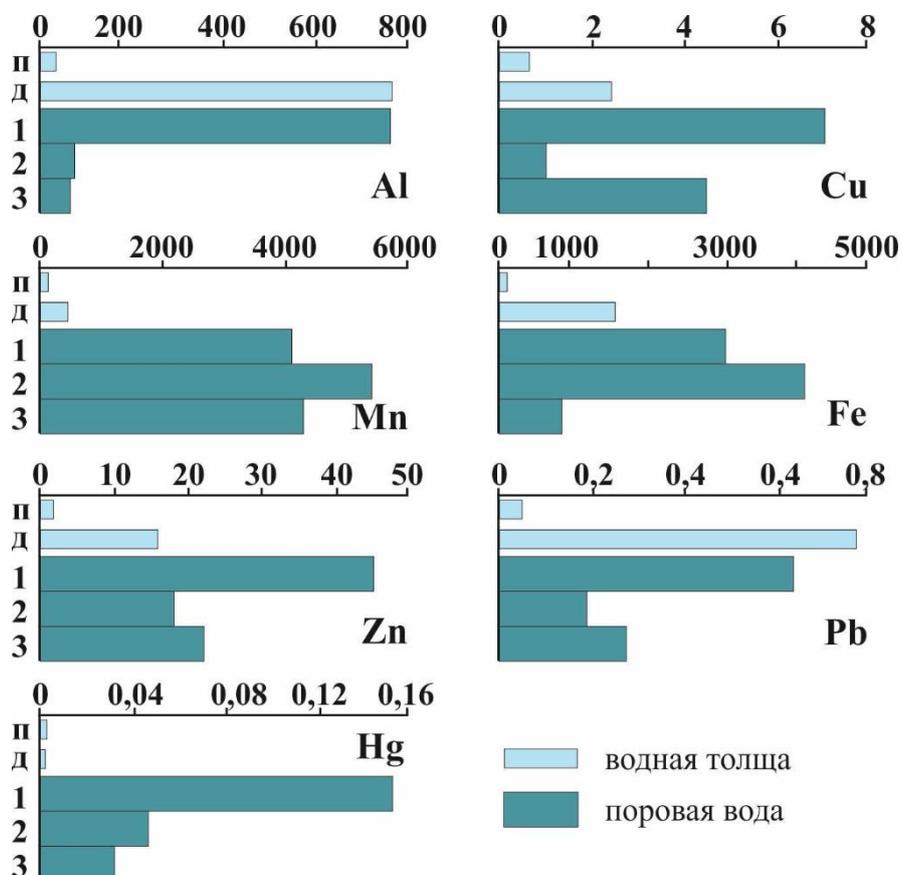


Рисунок 10 – Распределение микроэлементов в водной толще и поровой воде в районе основного седиментационного барьера Вихоревского залива. П – поверхностная вода, Д – придонная вода. Поровая вода: 1 – слой 0-35 см, 2 – слой 35-65 см, 3 – слой 65-100 см.

Только концентрации Hg в воде залива значительно ниже ее концентраций в поровой (рис. 10). Вариации между концентрациями Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Cd, Pb менее значимы, а концентрация Al в придонной воде и поровой воде верхнего слоя донных отложений близки между собой. Из рассматриваемых микроэлементов, в статистической отчетности (Государственный доклад, 2001, 2017) приводятся данные только по Fe, ежегодно поступающего с сточными водами в огромных количествах (25,8 т в 2000 г., 24,1 т в 2016 г.). Перенос Fe, а также Mn, в околонеитральных водах р. Вихорева осуществляется в виде взвеси, большая часть которой оседает на седиментационном барьере, что определяет их высокие концентрации в поровых водах. Дальнейшее поведение этих элементов связано с изменяющимся редокс потенциалом: в окислительных условиях они осаждаются, в восстановительных – растворяются. Как показано выше, поверхностные донные отложения барьерной зоны окрашены характерным коричневым цветом гидроксидов марганца и железа ( $Mn^{3+}$  и  $Mn^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$  и  $Fe^{2+}$ ). При близких концентрациях Mn по всей глубине донных осадков, концентрация Fe в слое 65-100 см существенно ниже, чем в вышележащих слоях (рис. 10). Изучение форм нахождения элементов в донных отложениях барьерной зоны показало, что доля марганца, находящегося в водорастворимой (наиболее подвижной) фракции, составляет 32% (от суммы фракций), а доля железа в органической (потенциально подвижной) фракции – 37%. При разрушении органического вещества, связанное с ним железо высвобождается. Диффузию Fe и Mn из донного осадка показывает их концентрация в придонной воде (1597 и 511,5 мкг/л, соответственно), увеличенная, по сравнению, с поверхностной (103,7 и 64,4 мкг/л, соответственно). Влияние накопленных в донных отложениях элементов на состав водной толщи залива определяет и повышенные, по сравнению с поверхностной водой, концентрации Al, Cr, Co, Cu, Zn, Pb в придонных водах.

Неравномерное распределение Al, Cr, Co, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg в поровых водах по глубине донного осадка может быть определено следующими условиями. В первую очередь, это химический состав исходно захороненной в донных отложениях воды, который напрямую связан с составом сточных вод Братской промышленной зоны. Дальнейшее поведение элементов в системе «поровая вода – донные отложения» определяется изменяющимися физико-химическими условиями. В целом, можно отметить, что при длительном непрерывном поступлении элементов техногенного происхождения в донных отложениях сопряженно проходят процессы «закрепления-вымывания». Так, в анаэробных условиях в результате процессов сульфатредукции и появления  $H_2S$  образуются трудно растворимые в воде соединения металлов ( $ZnS$ ,  $PbS$  и т.д.), что приводит к их осаждению в составе донных отложений. В более глубоких слоях осадка идут сложные процессы метаногенеза, способствующие появлению

более подвижных и токсичных соединений, например, метилртути ( $\text{HgCH}_3$ ). Повышенная растворимость соединений металлов, вызванная сдвигом рН к умеренно кислым условиям при разложении органического вещества, может привести к поступлению элементов антропогенного происхождения в водную среду. Миграция элементов связана также и с их захватом гидроксидами Fe, Al, Mn.

Несмотря на выявленную неравномерность распределения концентраций микроэлементов в поровых водах по глубине донных отложений, в барьерной зоне Вихоревского залива явно просматривается накопление большинства из них в поровых водах верхнего слоя (рис. 10). В настоящее время концентрации Al, Mn, Fe, Co в загрязненной воде р. Вихорева меньше, чем в придонной воде барьерной зоны. Концентрации Cr, Co, Cu, Zn, As, Cd, Pb в придонной воде барьерной зоны выше, чем в поверхностной. Такое распределение элементов в водной среде подтверждает существующий диффузионный поток элементов техногенного генезиса из донных отложений, а значит определяет их, как источник вторичного загрязнения. Активизации поступления элементов в придонную воду может способствовать смена уровня водоема, ветровое перемешивание вод и т.д. (Мартынова, 201; Khadka, Ramanathan, 2013).

В соответствии с морфологическими особенностями (Перельман, 1989), выделенный барьер может рассматриваться, как латеральный, так и радиальный. Изучение пространственного распределения концентраций элементов в поверхностных и придонных водах акватории залива (латеральный барьер) показывает, что, частично, он выполняет свои функции – предотвращает перенос вещества в русловую часть водохранилища, а, значит, является основной сдерживающей силой для элементов техногенного происхождения, поступающих с водой р. Вихорева. Аномальная геохимическая контрастность, которая наблюдается при рассмотрении элементов в поверхностных, придонных и поровых водах барьера (радиальный барьер), определяет исчерпание его способности к накоплению, и показывает необратимость проходящих процессов. Несомненно, опасность развития этой стадии геохимического барьера связана с усиливающейся возможностью вторичного поступления потенциально токсичных элементов, накопленных в донных отложениях, в водную среду.

#### *Гидрохимия поровых вод Братского водохранилища*

Общую направленность диагенетических процессов в Братском водохранилище показывает цвет донных отложений: коричнево-оранжевые осадки верхнего (0,5-1,0 см) слоя сменяются на серые и темно-серые нижележащие слои, в которых происходит переход в раствор наиболее лабильных компонентов органики (Сорг от 0,2 до 3,6%) за счет микробиологических превращений. Отрицательные значения Eh (рис. 11) в

поровых водах серых и темно-серых слоев показывают, что в донных отложениях Братского водохранилища идут восстановительные процессы.

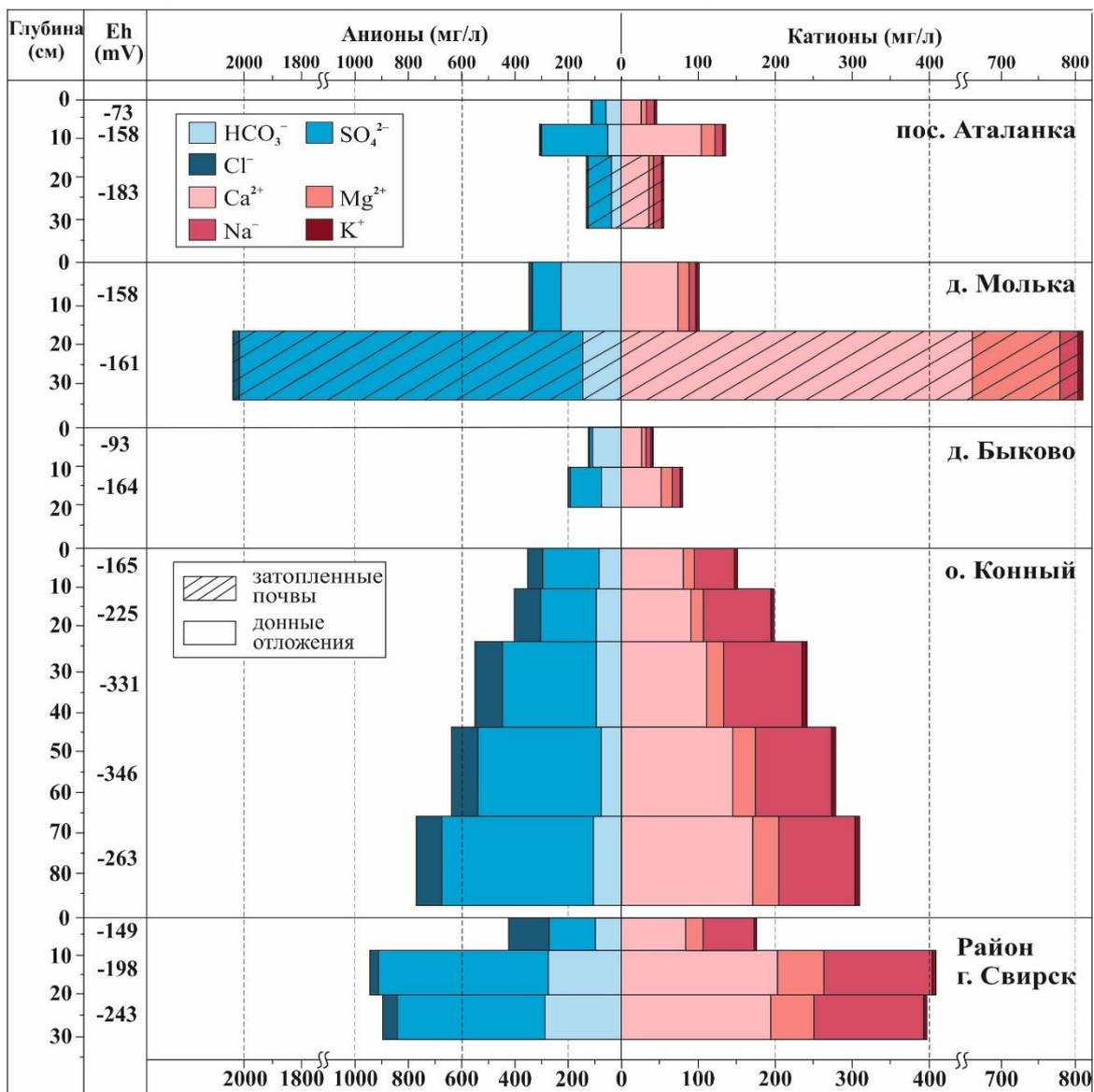


Рисунок 11 – Распределение главных ионов в поровых водах русловой части Братского водохранилища

Более чем через 50 лет после создания водохранилища сравнение состава водной толщи и поровой воды показало различия в концентрации главных ионов (табл. 1, рис. 11). Наиболее близкими к водной толще являются поровые воды донных осадков, отобранных между заливами Када и Уда, с наименьшей (7 см) для русловой части водохранилища мощностью. Максимальные концентрации главных ионов определены в поровых водах затопленных почв заливов Унга, Оса, Талькино и русловой части напротив д. Молька. Помимо смены окислительно-восстановительных условий, одним из показателей процесса раннего диагенеза является изменение HCO<sub>3</sub>-Ca состава придонных вод, захваченных частицами во время осадкообразования.

Состав поровой воды различен как по акватории, так и глубине донных осадков:  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ ,  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ ,  $\text{SO}_4$  или  $\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$  с переменными катионами, в основном Ca. Минерализация, увеличивающаяся от верхних к нижним слоям осадка, составляет от 165,9 до 2073,0 мг/л, затопленных почв – от 196,3 до 4608,1 мг/л. Величина pH от слабокислой (6,33) до околонеutralной (7,88).

Существенную роль в формировании химического состава поровых вод играет терригенный материал, поступающий в водоем в процессе разрушения горных пород (Aleksander-Kwaterczak, Zdechlik, 2016). На водосборе Братского водохранилища наиболее распространенными являются породы карбонатной и сульфатной формаций, в состав которых входят доломиты, известняки (кальцит), гипсы и ангидриты (Братское водохранилище, 1963). На диаграмме Гиббса, позволяющей выделять ведущие факторы формирования состава вод, большинство проб поровой воды попадают в зону доминирования горных пород (рис. 12). Насыщение поровой воды  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  происходит в результате растворения сульфатно-карбонатного осадочного материала. Пробы поровых вод затопленных почв и донных отложений зал. Унга, Оса и близкой к ним русловой станции наблюдений (район д. Молька), в которых определены самые высокие концентрации  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , попадают на диаграмме в зону доминирования испарения. Источником  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  в этих образцах является засоленная почва, приуроченная к Ангаро-Унгинскому расширению. В присутствии солей растворимость  $\text{CaSO}_4$  значительно повышается.

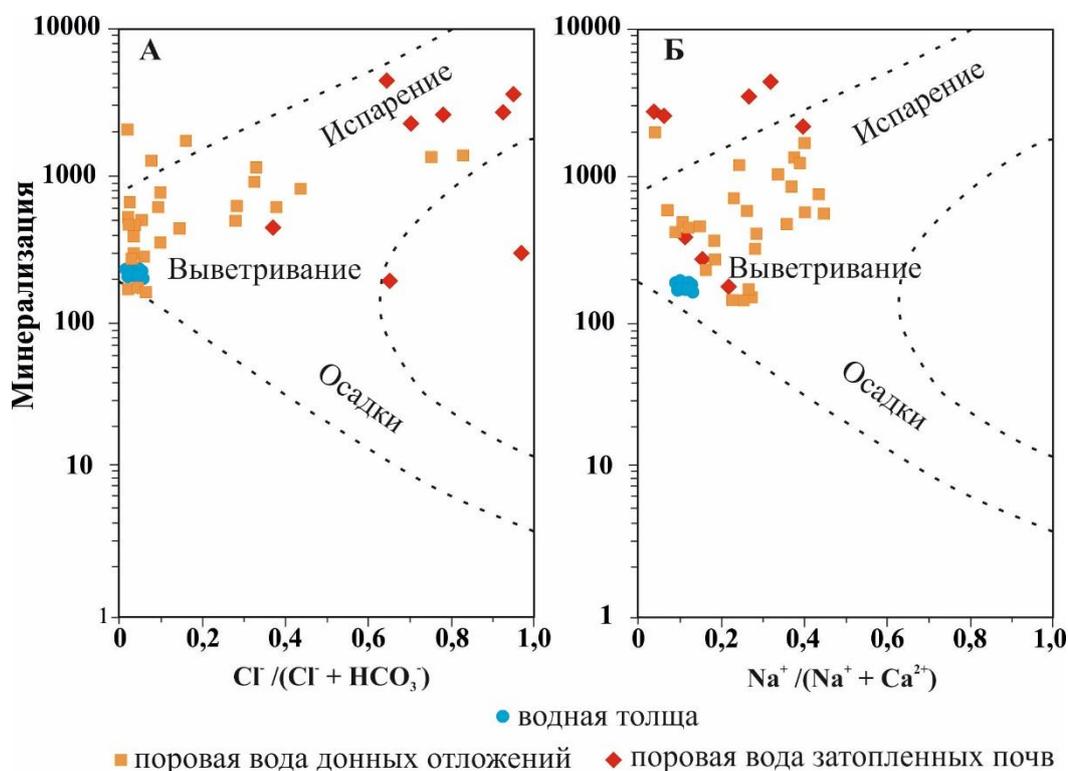


Рисунок 12 –  
 Диаграмма  
 Гиббса для вод  
 Братского  
 водохранилища

Известно, что в восстановительных условиях концентрация  $\text{SO}_4^{2-}$  снижается в поровых водах по глубине донных отложений в процессе бактериальной сульфатредукции (Страхов, 1962; Леонова и др., 2018). Однако, его концентрации, а также  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ , в поровых водах Братского водохранилища, напротив, увеличиваются (рис. 11). Такие результаты показывают, что еще одним фактором, влияющим на состав поровых вод водохранилища, является подток грунтовых вод. В большей степени это относится к району г. Свирск, о. Конный и зал. Унга. Особенности тектонического строения территории исследования определили повышение гипсометрических отметок проявлений разгрузки подземных вод глубоких водоносных горизонтов в период наполнения водохранилища (Овчинников и др., 1999). Наибольшие изменения произошли на площади от г. Усолье-Сибирское до зал. Унга, на которой ведущую роль в формировании состава подземных вод играет куполообразное внедрение минерализованных солоноватых сульфатных и хлоридных натриевых подземных вод глубоких горизонтов (гидрогеохимический купол) в верхнюю, в большей степени пресноводную, часть гидрогеохимического разреза (Павлов, 1978).

## **Глава 5. Оценка антропогенного воздействия и методические аспекты мониторинга вод ангарской системы**

Результаты оценки качества вод Ангарской системы показали, что большинство концентраций микроэлементов в разные по антропогенной нагрузке периоды значительно ниже официально установленных в РФ нормативов (ПДК). Это определяет, что вода р. Ангары и ее водохранилищ, также как и оз. Байкал, по концентрации исследуемых элементов является водой высокого качества. Расчет индексов загрязнения (CF, NPI, PLI) с использованием в качестве контрольного материала концентраций, рекомендуемых всемирной организацией здравоохранения (WHO), для вод наиболее техногенно нагруженного Братского водохранилища также показал по большинству проб воды низкий уровень загрязнения даже в период максимальной техногенной эмиссии. Однако, результаты изучения химического состава гидробионтов водоема (Азовский, 2010; Пастухов, 2012; Пастухов, Полетаева, 2015, 2022; Chuparina et al., 2023), отражающего ответные реакции живых организмов на антропогенные преобразования среды их обитания, выявили его значительные изменения, особенно на участках, прилегающих к промышленным зонам. В связи с этим, выводы о благополучной гидрохимической обстановке водоема, основанные на сравнении концентраций элементов в воде с официально принятыми нормативами, с точки зрения экологического риска и возможной деградации экосистем водохранилищ р. Ангары весьма некорректны.

Сравнительная характеристика гидрохимического состава Ангарской системы с водоемами мира показала необходимость применения избирательного подхода, направленного на правильный выбор контрольного материала, используемого как геохимическая фоновая концентрация элементов. Взаимосвязь р. Ангары и ее водохранилищ с оз. Байкал предопределяет использование в качестве такого критерия концентраций элементов в воде самого озера. Как показали исследования, в качестве створа, замыкающего естественные потоки вещества в оз. Байкал, может рассматриваться исток р. Ангары. При этом, более объективным является использование медианы концентраций, которая в отличие от среднего значения нечувствительна к полученным выделяющимся значениям, потенциально отражающим антропогенное воздействие (например, поверхностный сток с территории пос. Листвянка).

Для оценки качества вод водохранилищ Ангарского каскада ГЭС использованы концентрации микроэлементов, полученные в воде створа (левый, правый берега, середина) истока р. Ангары в 2021-2022 гг. Индексы загрязнения, рассчитанные относительно концентраций элементов в воде истока реки, показали, что антропогенная нагрузка на водоемы, особенно Братское (рис. 13) и Усть-Илимское водохранилища, довольно существенна. Вместе с этим, для Братского водохранилища определено улучшение качественных характеристик воды в период снижения антропогенной нагрузки, что подтверждает правильность использования выбранных критериев в качестве геохимических фоновых концентраций.

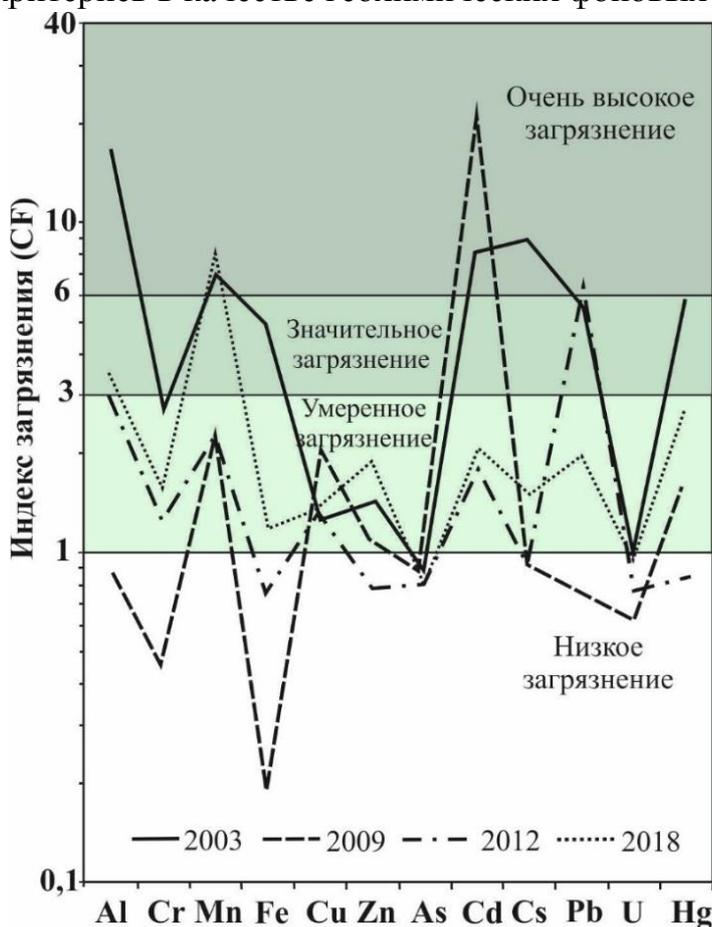


Рисунок 13 – Средние значения индекса загрязнения (CF) в Братском водохранилище в разные по антропогенной нагрузке периоды

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность проведения исследований, направленных на изучение геосферных циклов элементов в водных природно-антропогенных экосистемах, обоснована глобальной трансформацией естественных потоков вещества в период антропогенеза. Теоретическое заключение об изменениях миграционных характеристик элементов, произошедших из-за долговременной антропогенной эмиссии вещества или вследствие антропогенной трансформации самой водной экосистемы, возможно сделать только на основе комплексных натурных мониторинговых наблюдений. Обобщение многолетних данных по накоплению, распределению и формам нахождения элементов в сопряженных средах «вода – донные отложения» Ангарской системы позволило сделать следующие выводы:

1. Основным природным источником формирования режима растворенных веществ Ангарской водной системы, как и до зарегулирования р. Ангары, является сток оз. Байкал. По основному ионному составу наиболее близким к оз. Байкал является исток р. Ангары и Иркутское водохранилище. В Братском и Усть-Илимском водохранилищах происходит увеличение концентраций главных ионов, связанное как с влиянием крупных антропогенных источников (для Братского водохранилища – Усольская промышленная зона, для Усть-Илимского – р. Вихорева, катастрофически загрязненная сточными водами Братской промышленной зоны), так и с определенной ранее для вод незарегулированной р. Ангары природной составляющей. Особенностью временной динамики концентраций главных ионов в воде Богучанского водохранилища являются вариации концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , которые при его заполнении до проектной отметки и стабилизации уровня не снизились до концентраций в воде этого участка р. Ангары до зарегулирования. Фактором, влияющим на концентрации ионов в воде после создания водохранилища, может являться изменение гидрогеохимической обстановки в бассейне водоема.

Концентрации биогенных компонентов и кислородный режим вод изучены в заливах Братского водохранилища, подверженных влиянию лесозаготовительной деятельности, и Богучанском водохранилище. Основной формой нахождения азота в изученных водоемах является  $\text{NO}_3^-$ . Небольшие концентрации  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_2^-$  связаны с высокой скоростью процессов нитрификации, протекающих в благоприятной окислительной обстановке. В придонных водах заливов Братского водохранилища процессы деструкции органического вещества определяются увеличением концентраций  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ . В период заполнения Богучанского водохранилища определено снижение концентраций  $\text{NO}_3^-$  и, напротив, увеличение  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{PO}_4^{3-}$ . Вместе с этим, значительных преобразований, связанных с взаимодействием водных масс с затопленными почвами и изменением биологической продуктивности, в

концентрации биогенных компонентов не определено, кислородный режим остается благоприятным для гидробионтов.

Основные черты байкальских вод отражает и микроэлементный состав вод Ангарской системы. Отличительной особенностью для вод истока р. Ангары является высокая степень постоянства его микроэлементного состава. В водохранилищах вариации концентраций микроэлементов, по сравнению с главными ионами, в пространственно-временном аспекте более значительны. Геохимические аномалии микроэлементов в воде Братского и Усть-Илимского водохранилищ определены вблизи техногенных источников их поступления. Общим для большинства элементов является уменьшение концентраций по мере удаления от источника загрязнения, что отражает вклад одного из главных процессов, участвующих в самоочищении водных экосистем – разбавления (или перемешивания высокозагрязненных сточных вод с большим объемом маломинерализованных вод водохранилищ). В качестве природных источников рассматривается поступление микроэлементов в водную толщу с подземными водами. В отличие от антропогенных источников, влияние их локально и отражается, в основном, на составе придонных вод.

2. Результаты исследований в разные по антропогенной нагрузке периоды выявили в воде Братского водохранилища горизонтальную и вертикальную дифференциацию концентраций элементов, на основании которых выделены основные особенности их миграции в сопряженных средах «вода – донные отложения», а также еще один главный процесс, с помощью которого водные экосистемы пытаются восстановить свой естественный гидрохимический состав – накопление элементов антропогенного происхождения в донных отложениях. На примере ртути, поступающей в Братское водохранилище от предприятия «Усольехимпром», показано, что благодаря сорбции на взвешенных частицах и их последующего выведения в донные отложения происходит уменьшение концентраций токсиканта в водной среде. В донных отложениях верхней, наиболее техногенно нагруженной части Братского водохранилища, помимо ртути, содержатся высокие концентрации Pb и As, также обуславливающие специфику техногенного загрязнения района исследования. Распределение элементов по глубине донных отложений и затопленных почв верхней части водохранилища показало, что основной закономерностью накопления Cu, Zn, Pb, As, также как Hg, является приуроченность их высоких концентраций к периодам интенсивной работы химических предприятий.

3. Создание на р. Ангаре каскада водохранилищ, изменившее условия осадконакопления, привело к образованию седиментационных геохимических барьеров, на которых происходит осаждение взвешенного материала, поступающего

с промышленных территорий в составе стока. По результатам исследования выделено два наиболее значимых для Ангарской водной системы барьера:

– основной седиментационный геохимический барьер (южная оконечность о. Конный), образованный после создания Братского водохранилища, приурочен к вхождению водного потока из области переменного подпора в область постоянного подпора. Особенностью барьера, отражающей процессы самоочищения водоема, является аккумуляция значительных количеств загрязняющих веществ в донных отложениях. Уменьшение концентраций элементов в верхних слоях донных отложений, по сравнению с нижележащими слоями, позволяют говорить о «захоронении» вещества антропогенного происхождения. Значительная доля потенциально токсичных элементов во фракции легкоразрушающихся силикатов и нерастворимом остатке показывает, что большая их часть надежно закреплена в донных отложениях барьера. Несмотря на это, увеличение концентраций микроэлементов в придонной воде в период снижения антропогенной нагрузки является показателем вымывания уже отложенного материала. Присутствие элементов в потенциально подвижных и подвижных формах в донных отложениях определяет роль барьера, как вторичного источника загрязнения водной среды;

– седиментационный геохимический барьер «приток–залив водохранилища», образованный после создания Усть-Илимского водохранилища, сформирован с участием долговременной неконтролируемой эмиссии взвешенных веществ, поступающих со сточными водами Братской промышленной зоны в р. Вихорева и далее в Вихоревский залив. Выделенный барьер является основным фактором, определяющим миграцию элементов антропогенного происхождения. Образование барьера препятствует распространению большей части загрязняющих веществ в русловую часть Усть-Илимского водохранилища за счет их аккумуляции в донных отложениях. Однако, изучение распределения, накопления и форм нахождения элементов в сопряженных средах «водная толща – поровые воды – донные отложения» показали, что в настоящее время барьерная зона в Вихоревском заливе является самостоятельным источником загрязнения Усть-Илимского водохранилища.

4. Геохимические преобразования в системе «водная толща – донные отложения» новых природно-антропогенных водоемов рассмотрены при изучении основного ионного состава поровых вод Братского водохранилища. В донных отложениях водохранилища формируются поровые воды различного гидрохимического состава:  $SO_4-HCO_3$ ,  $HCO_3-SO_4$ ,  $SO_4$  или  $HCO_3-Cl-SO_4$  с переменными катионами, в основном Ca. Сопоставление концентраций главных ионов в водной толще водохранилища и поровой воде, а также их распределение в поровой воде по глубине донных отложений позволили установить, что основным фактором,

влияющим на изменение исходного состава воды, является растворение осадочного материала. Дополнительными источниками главных ионов в поровых водах могут быть субаквальная разгрузка грунтовых вод и антропогенный привнос элементов. Признаком раннедиагенетических изменений в донных отложениях является смена окислительно-восстановительных условий. Отрицательные значения  $E_h$  в поровых водах и цветовая характеристика донных осадков показывают, что в геохимических условиях водоема идет восстановительный диагенез.

5. Оценка антропогенного воздействия, проведенная с использованием концентраций микроэлементов в воде истока р. Ангары, как региональных фоновых концентраций, выявила негативные изменения качества вод Ангарской системы, особенно Братского и Усть-Илимского водохранилищ. В тоже время, несмотря на значительный антропогенный пресс, анализ пространственно-временной динамики химического состава вод и донных отложений водохранилищ р. Ангары показал, что водоемы используют свои ресурсы для самоочищения. Несомненно, возврат геохимического состава антропогенно трансформированного водоема к первоначальному состоянию невозможен. Однако, снижение антропогенной нагрузки на Ангарскую водную систему является реальной задачей. В связи с этим, представленные в диссертационной работе методические рекомендации по нормированию антропогенной нагрузки (в том числе, по принятию региональных геохимических стандартов) могут быть использованы, как инструмент, для совершенствования существующей системы природоохранных мероприятий, что несомненно будет способствовать сохранению уникальных водных ресурсов Восточной Сибири.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах из перечня ВАК, Scopus, WoS*

1. Коваль П.В., Калмычков Г.В., Лавров С.М., Удодов Ю.Н., Бутаков Е.В., Файфилд Ф.В., Алиева (Полетаева) В.И. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища // Доклады Академии Наук. – 2003. – Т 388. – № 2. – С. 225–227.

2. Алиева (Полетаева) В.И., Ломоносов И.С., Гребенщикова В.И. Динамика поступления техногенных микроэлементов в воды Братского водохранилища / Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2009. – № 3 – С. 241–247.

3. Алиева (Полетаева) В.И., Бутаков Е.В., Пастухов М.В., Андрулайтис Л.Д. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 5. – С. 431–438.

4. **Алиева (Полетаева) В.И.**, Гребенщикова В.И., Загорулько Н.А. Многолетний мониторинг и современные методы исследования микроэлементного состава вод реки Ангара // Инженерная экология. – 2011. – № 3. – С. 24–34.
5. **Алиева (Полетаева) В.И.**, Пастухов М.В. Гидрохимическая характеристика реки Ангары в районе влияния Усольского промышленного узла // География и природные ресурсы. – 2012. – № 1. – С. 68–73.
6. Шевелева Н.Г., Поповская Г.И., Пастухов М.В., **Алиева (Полетаева) В.И.** Оценка современного состояния зоопланктона заливов Братского водохранилища // Бюллетень МОИП, Отд. биол. – 2012. – Т. 117. – Вып. 4. – С. 37–47.
7. **Алиева (Полетаева) В.И.**, Загорулько Н.А. Влияние природных и техногенных факторов на гидрохимический состав рек промышленной зоны г. Иркутска // Вода: химия и экология. – 2013. – № 6. – С. 16–21.
8. **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В. Оценка заливов Братского водохранилища по микробиологическим и гидрохимическим показателям // Вода: химия и экология. – 2015. – № 6. – С. 86–91.
9. Загорулько Н.А., **Полетаева В.И.** Динамика гидрохимического состава малых притоков верхней части Братского водохранилища // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 3(56). – С. 112–124.
10. Холодова М.С., Пастухов М.В., **Полетаева В.И.** Особенности минерально-вещественного состава твердофазных выпадений снегового покрова территории г. Свирска // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 4 (57). – С. 121–130.
11. **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.
12. Ciesielski T. M., Pastukhov M.V., Leeves S. A., Farkas J., Lierhagen S., **Poletaeva V. I.**, Jenssen B. M. Differential bioaccumulation of potentially toxic elements in benthic and pelagic food chains in Lake Baikal // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – V. 23 – I. 15. – P. 15593–15604.
13. Шевелева Н.Г., Пастухов М.В., Зайцева Е.П., **Полетаева В.И.** Сообщество зоопланктона верхнего участка Богучанского водохранилища в период его заполнения // География и природные ресурсы. – 2016. – № 6. – С. 81–85.
14. **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.

15. **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В. Ионный состав поровых вод донных отложений Братского водохранилища в зоне наибольшего осадконакопления // Проблемы региональной экологии. – 2017. – № 4. – С. 16–20.
16. **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В., Загорулько Н.А., Белоголова Г.А. Изменение гидрохимического состава заливов Братского водохранилища в результате лесозаготовительных работ // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45. – № 3. – С. 278–288.
17. **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В., Загорулько Н.А. Особенности изменения гидрохимического режима Богучанского водохранилища в период его заполнения // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. – С. 97–108.
18. **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.
19. Pastukhov M.V., **Poletaeva V.I.**, Tirskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 321. – 012041.
20. Kholodova M.S., **Poletaeva V.I.**, Pastukhov M.V. Features of the microelement composition of the liquid phase in snow cover from the towns of Usolye-Sibirskoe and Svirsk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 381. – 012041.
21. Belogolova G.A., Baenguev B.A., Gordeeva O.N., Sokolova M.G., Pastukhov M.V., **Poletaeva V.I.**, Vaishlya O.B. Rhizobacteria effect on bioaccumulation and biotransformation of arsenic and heavy metal compounds in the technogenous soils // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 381. – 012007.
22. **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В., Тирских Э.Н. Особенности формирования химического состава поровых вод донных отложений верхнего участка Братского водохранилища // География и природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 119–126.
23. **Poletaeva V.I.**, Pastukhov M.V., Tirskikh E.N. Dynamics of Trace Element Composition of Bratsk Reservoir Water in Different Periods of Anthropogenic Impact (Baikal Region, Russia) // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2021. – V. 80. – I. 3 – P. 531–545.
24. **Poletaeva V.I.**, Tirskikh E.N., Pastukhov M.V. Hydrochemistry of sediment pore water in the Bratsk reservoir (Baikal region, Russia) // Scientific Reports. – 2021. – V. 11. – I. 1 – 11124.
25. **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В. Техногенное воздействие сточных вод на гидрохимический состав р. Ангары // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 3. – С. 90–95.
26. **Полетаева В.И.** Гидрохимическая изменчивость реки Ангары при создании Богучанского водохранилища (Россия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 146–158.

27. **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. – I. 21– P. 3564.

28. Chuparina E.V., **Poletaeva V.I.**, Pastukhov M.V. Metals Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb in Aquatic Plants of Man-made Water Reservoir, Eastern Siberia, Russia: Tracking of Environment Pollution // *Pollution*. – 2023. – V. 9. – № 1. – P. 23–38.

29. Pastukhov M.V., **Poletaeva V.I.**, Hommatlyyev G.B. Hydrochemical Characteristics and Water Quality Assessment of Irkutsk Reservoir (Baikal Region, Russia) // *Water*. – 2023. – V. 15 – I. 23. – P. 4142.

30. Тарасюк Н.А., **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В. Факторы формирования гидрохимического состава поверхностных вод бассейна реки Куды (Иркутская область) // *Геосферные исследования*. – 2023. – № 4. – С. 84–101.

31. 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.

32. Цветкова Е.А., **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В. Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усолья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 39–58.

*Государственный доклад*

33. Гребенщикова В.И., Загоруйко Н.А., **Алиева (Полетаева) В.И.** Мониторинговые исследования химического состава воды истока р. Ангары // Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2011 году». – Иркутск: Изд-во ООО «Форвард», 2012. – С. 318–324.

*Раздел в монографии*

34. Пастухов М.В., **Полетаева В.И.** Экологические последствия техногенного загрязнения экосистемы Братского водохранилища // В кн.: *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Региональные проблемы безопасности»*. Раздел II. Территориальные риски регионов Сибири. Кузбасс. Енисейская Сибирь. Байкал / Науч. руков. чл.-корр. РАН Махутов Н.А., под ред. Москвичева В.В. – М.: МГОФ «Знание», 2024. – С. 375–385.

*База данных*

35. Пространственная база данных «Неорганические загрязнители в стоке оз. Байкал». Авторы **Полетаева В.И.**, Пастухов М.В. (свидетельство о государственной регистрации № 2023620234 от 16.01.2023).