

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УШАКОВА ЕВГЕНИЯ СЕРГЕЕВНА

**ЭКОГЕОХИМИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ УРБАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРНОГО ПРИКАМЬЯ**

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
доцент Меньшикова Е.А.

Пермь – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ИЗУЧЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ.....	11
1.1 Малые реки: геохимия речных долин, экологические проблемы и современное состояние	11
1.2 Общая характеристика Соликамско-Березниковской агломерации.....	13
1.3 Характеристика объектов исследования.....	16
1.4 Природные условия Соликамско-Березниковской агломерации.....	21
1.4.1 Общая характеристика климатических, геоморфологических и гидрологических условий.....	21
1.4.2 Общая характеристика геолого-гидрогеологических условий.....	23
1.5 Источники и виды техногенного воздействия на окружающую среду Соликамско-Березниковской агломерации.....	27
1.6 Гидрохимические и гидробиологические исследования на севере Прикамья.....	35
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	39
2.1 Методы полевых исследований.....	39
2.2 Лабораторные химико-аналитические методы исследования.....	41
2.3 Методы камеральной обработки результатов исследования.....	43
ГЛАВА 3. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛЫХ РЕК СОЛИКАМСКО-БЕРЕЗНИКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ.....	53
3.1 Экологическая характеристика водосборных бассейнов исследуемых малых рек.....	53
3.2 Химический состав речных вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации.....	57
3.3 Эколого-геохимическая оценка речных вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации.....	62
3.4 Эколого-геохимическая оценка донных отложений малых рек Соликамско-Березниковской агломерации.....	76
3.5 Анализ специфики техногенеза в бассейне малых рек Соликамско-Березниковской агломерации.....	97
3.5.1 Геохимические характеристики поверхностных вод и донных отложений малых рек.....	97
3.5.2 Характеристика эколого-геохимического состояния устьевой части малых рек.....	101
ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ СБРОСА СТОЧНЫХ ВОД.....	109
4.1 Характеристика бассейна р. Толыч.....	109
4.2 Эколого-геохимическая оценка бассейна р. Толыч.....	113
4.3 Оценка качества воды по биотестированию.....	117
4.4 Оценка качества воды по развитию зообентоса.....	119

4.5 Оценка качества воды по показателям ихтиофауны.....	123
4.6 Индикаторы техногенного загрязнения водных объектов в условиях сброса сточных вод..	126
ГЛАВА 5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	132
5.1 Анализ существующей структуры мониторинга водных объектов.....	133
5.2 Российский опыт организации экологического мониторинга водных объектов.....	136
5.3 Зарубежный опыт организации экологического мониторинга водных объектов.....	138
5.4 Принцип организации работы водопотребления, водоотведения и его контроль.....	140
5.5 Опыт реализации мероприятий по снижению негативного воздействия на водные объекты.....	145
5.6 Предложения по организации экологического мониторинга на территории г. Соликамска и г. Березники.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Малые реки урбанизированных территорий, на водосборах которых осуществляется интенсивная хозяйственная деятельность, характеризуются наибольшей уязвимостью и, как следствие, чувствительностью к техногенным процессам, происходящим в пределах каждого такого бассейна (Ткачев и др., 2002; Янчук, 2018). Каждая речная долина представляет собой геосистему, в которой происходит распределение и миграция химических элементов (Кузнецов, 1986), среди которых существенную опасность представляют элементы со свойствами металлов и металлоидов с атомной массой больше 50, которые являются обязательными для оценки качества вод с использованием санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных нормативов (Соромотин и др., 2019).

Проблемы загрязнения малых рек в пределах крупных промышленных центров России отмечаются в работах В.И. Данилова-Данильяна (2020), Е.В. Веницианова (2020), С.В. Ясинского (2023), А.Ю. Опекунова (2022), В.Е. Закруткина (2021), Е.П. Янина (2018). Не исключением является акватория Камского водохранилища на р. Каме (Пермский край), где на протяжении 44 км от г. Соликамска до г. Березники длительное время она подвержена техногенному воздействию предприятий, связанных с Верхнекамским месторождением калийно-магниевых солей. С открытием месторождения на левобережье р. Камы введены в действие крупнейшие в России производители хлористого калия, соды, магния и редких металлов, высших алифатических аминов, натриевой селитры и кристаллического нитрита натрия и др. Производство продукции горно-химической отрасли сопровождается организацией объектов размещения отходов и сбросом сточных вод разной степени очистки как в малые реки, так и в акваторию Камского водохранилища, которые суммарно составляют 900 млн м³ в год. Воды Камского водохранилища на этом участке длительное время соответствует 3-му классу качества воды («очень загрязненные») (Доклад..., 2022).

Малые реки, непосредственно впадающие в Камское водохранилище в пределах г. Соликамска и г. Березники, длительное время подвержены техногенному воздействию от точечных и диффузных источников загрязнения. Современный экологический мониторинг водных объектов на территории Пермского края осуществляется в пределах Камского и Воткинского водохранилищ только по пунктам наблюдений федеральной сети Росгидромета, при этом программы наблюдений не предусматривают анализ качества вод притоков первого порядка, несмотря на то, что малые реки Соликамско-Березниковской агломерации являются приемниками сточных вод и диффузных источников загрязнения, осуществляют вынос загрязняющих веществ в акваторию Камского водохранилища (Лепихин и др., 2020; Мирошниченко и др., 2021; Меньшикова, 2022; Хайрулина, 2022). Разрешенные сбросы

сточных вод в малые реки на этой территории осуществляются на протяжении 90 лет, включая активный сброс неочищенных сточных вод до 90-х годов прошлого столетия. Так, минерализация вод такого объекта в этот период (р. Черной на территории г. Соликамска) достигала 200 г/л (Горбунова и др., 1990; Бельтюков, 1996).

Современный мониторинг рек на территории Пермского края ограничивается лишь исследованиями качества воды без должного внимания к оценке загрязнения донных отложений как источника первичного и вторичного загрязнения водных объектов, видовому разнообразию гидробионтов в местах интенсивного промышленного воздействия на малых реках. Оценка физико-химических показателей речных вод в рамках осуществляемого государственного мониторинга является недостаточной для понимания потенциальной экологической опасности загрязнения водохранилищ, имеющих рыбохозяйственное и рекреационное значение. Изучение биотического компонента в сочетании с уровнем загрязнения донных отложений и качеством вод является направлением адекватной экологической оценки водных объектов с целью сохранения биоразнообразия и прогнозирования состояния водных экосистем в условиях интенсивного техногенного загрязнения. Своевременный контроль, охрана и восстановление водных объектов в пределах акватории Верхней Камы является актуальной и важной задачей для целей оздоровления р. Камы.

Целью диссертационного исследования является оценка эколого-геохимического состояния малых рек на территории Соликамско-Березниковской агломерации в северной части Прикамья по данным изучения речных вод и донных отложений с применением интегральных и биоиндикационных показателей.

Основные задачи:

- 1) Характеристика техногенного воздействия в пределах водосборных бассейнов малых рек на территории Соликамско-Березниковской агломерации;
- 2) Изучение особенностей распределения исследуемых Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg в воде и донных отложениях малых рек района исследования, характеристика их эколого-геохимического состояния;
- 3) Комплексирование абиотических и биотических подходов к оценке уровня загрязнения водного объекта на примере р. Толыч на территории г. Березники;
- 4) Обоснование подходов к программам мониторинга экологического состояния акватории Верхней Камы по данным эколого-геохимической оценки малых рек Соликамско-Березниковской агломерации.

Объектом исследования являются речные воды, донные отложения и гидробионты малых рек¹ на территории Соликамско-Березниковской агломерации в северной части Прикамья, **предметом исследования** – особенности распределения химических элементов в компонентах природной среды под влиянием природных и техногенных факторов.

Достоверность результатов и методы исследования. Химико-аналитические исследования выполнены в аккредитованных лабораториях Пермского государственного национального исследовательского университета. Для определения водородного показателя, растворенного кислорода, БПК₅ и катионно-анионного состава речных вод и донных отложений были использованы следующие методы: амперометрия, титриметрия, капиллярный электрофорез и потенциометрия. Содержание исследуемых микроэлементов в речных водах и донных отложениях определялось масс-спектральным методом на приборе BRUKER AURORA M90 ICP-MS (США). Достоверность защищаемых положений обеспечена использованием геохимических и статистических подходов, современных высокочувствительных аналитических методов с выполнением анализов в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам с контрольным определением 5–10% проб.

Токсичность донных отложений наиболее техногенно-нагруженного водного объекта Соликамско-Березниковской агломерации (р. Толыч) оценена методом биотестирования с применением двух тест-объектов: биолюминесцентные бактерии – *V. fischeri* (тест-система «Эколюм») и дафнии *Daphnia magna Straus* (Daphtoxkit F).

Научная новизна. Впервые на территории Соликамско-Березниковской агломерации выполнена экологическая оценка поверхностных вод и донных отложений малых рек по интегральным показателям загрязнения тяжелыми металлами, определены их условно-фоновые концентрации. Впервые для р. Толыч, как модельного объекта с наибольшим объемом поступления сточных вод, с применением различных биологических тест-объектов определена токсичность донных отложений, проведена идентификация факторов, влияющих на распределение гидробионтов в бассейне реки, показана значимость комплексирования данных об уровне загрязнения абиотических и состоянию биотических компонентов водных экосистем, находящихся в условиях сброса сточных вод.

Практическая значимость. Полученные результаты исследования могут быть использованы Администрацией городов Березники и Соликамска, а также природоохранными структурами Пермского края для развития программ мониторинга водных объектов. Разработанные подходы могут быть использованы природоохранными организациями других субъектов при проведении эколого-геохимических наблюдений для решения задач

¹ Малые реки и их притоки в г. Соликамске – р. Усолка и р. Чёрная; в г. Березники – р. Толыч и р. Зырянка.

прогнозирования экологической обстановки территорий с повышенным уровнем техногенного воздействия.

Полученные результаты исследования используются в учебном процессе на геологическом факультете ПГНИУ в рамках курсов «Геохимия ландшафтов для гидрогеологов», «Экологическая геохимия» образовательной программы магистратуры по направлению подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование».

Фактический материал и личный вклад автора. В основу работы положены результаты исследований с участием автора совместно с сотрудниками лаборатории экологической геологии ЕНИ ПГНИУ и с сотрудниками кафедры зоологии позвоночных и экологии и кафедры зоологии беспозвоночных и водной экологии ПГНИУ, проводимых в период 2014-2022 г.г. Автор лично принимала участие в опробовании речных вод и донных отложений, дальнейшей их пробоподготовке. Автором выполнена статистическая и графическая обработка данных с дешифрированием космоснимков, интерпретация полученных результатов интегральных и биоиндикационных показателей, сформулированы цель, задачи и основные защищаемые положения. Автором лично получены новые данные об экологическом состоянии малых рек, находящихся в условиях повышенной техногенной нагрузки.

За период исследований на территории Соликамско-Березниковской агломерации автором опробовано 47 водных объектов в пределах исследуемых водосборных бассейнов, отобрано и проанализировано 252 пробы речных вод и донных отложений, проведены гидробиологические исследования в пределах бассейна реки с наиболее существенным техногенным воздействием.

Основные научные результаты исследования получены при выполнении следующих проектов, где автор принимала участие в качестве исполнителя: программа Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 2019–0858 «Биогеохимические и геохимические исследования ландшафтов в условиях разработки месторождений полезных ископаемых, поиск новых методов мониторинга и прогноза состояния окружающей среды» (2020–2024 г.г.); проект РНФ № 22-24-20069 «Влияние техногенного загрязнения на водные экосистемы Прикамья» (2022-2023 г.г.); грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук, проект № МК-4377.2022.1.5 «Экологическое состояние водных бассейнов, находящихся в условиях сброса сточных вод: оценка, нормирование и подходы к восстановлению» (2022-2023 г.г.); проект РФФИ № 19-05-50071 Микромир «Оценка воздействия взвешенных наносов рек горнодобывающих районов на экологическое состояние Камского водохранилища» (2020-2022 г.г.); проект «Внедрение технологий снижения негативного техногенного воздействия на окружающую природную среду и рекультивации нарушенных земель при разработке месторождений полезных

ископаемых», реализуемый в рамках Программы Пермского НОЦ «Рациональное недропользование» (2021 г.).

Основные защищаемые положения.

1 защищаемое положение. На территории Соликамско-Березниковской агломерации варьирование содержаний макро- и микрокомпонентов в водах малых рек связано с техногенными и природными факторами в пределах водосборных бассейнов. Высокое содержание Cr, As, Cu, Ni и Cd коррелируется с Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . Наибольшая доля микрокомпонентов, превышающих условные фоновые значения, характерна для малых рек с наименьшей площадью водосбора, где техногенный сток значительно превышает естественный.

2 защищаемое положение. Среди исследованных объектов Соликамско-Березниковской агломерации наиболее высоким уровнем загрязнения микроэлементами донных отложений характеризуется р. Толыч со следующим рядом распределения элементов $\text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As}$, трансформацией химического состава водной вытяжки осадков (от HCO_3^- - Ca^{2+} к Cl^- - Na^+ и Ca^{2+}), что определяется спецификой и уровнем техногенного воздействия на водосборе.

3 защищаемое положение. Малые реки Соликамско-Березниковской агломерации являются важными объектами наблюдений в программах мониторинга, которые рекомендуется реализовывать с использованием как абиотических показателей состояния водных экосистем, так и подходов, основанных на прямом отклике водных сообществ на совокупное техногенное воздействие.

Апробация работы и публикации. Основное содержание и научные положения диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе 3 статьях в журналах перечня ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьях в изданиях, индексируемых международными базами данных в Web of Science и Scopus. Результаты полученных исследований представлены на конференциях: Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Водные ресурсы – основа глобальных и региональных проектов обустройства России, Сибири и Арктики в XXI веке» (Тюмень, 2022); годовая сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения» (Москва, 2020; Санкт-Петербург, 2022); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (Пермь, 2020, 2021, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2021, 2023); Всероссийская школа-семинар «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды» (Пермь, 2021, 2022); Международная молодежная научная школа «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (Ростов-на-

Дону, 2022); VII Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (лимнологическая школа-практика) (Петрозаводск, 2023).

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из 5 глав, введения, заключения, списка литературы (304 наименования, из них 95 на английском языке), общим объёмом 187 страниц машинописного текста и содержит 63 рисунка и 39 таблиц.

В главе 1 представлено обобщение по экологическим проблемам малых рек, источникам их загрязнения и охарактеризована степень экологической изученности территории исследования. Глава 2 содержит методологические аспекты полевых, лабораторных и камеральных работ для оценки эколого-геохимического состояния малых рек. В главе 3 дана характеристика водных объектов по результатам интегральных показателей загрязнения микроэлементами (ИЗВ, HEI, ERI, Zc, Igeo, RI, PECQ), рассмотрены закономерности изменения химического состава речных вод и донных отложений. В главе 4 охарактеризовано качество вод модельного объекта с использованием методов биотестирования и биоиндикации, с интерпретацией результатов абиотических индексов оценки загрязнения водных объектов в условиях повышенного техногенного воздействия. В главе 5 по результатам настоящих исследований с учетом российского и зарубежного опыта организации мониторинга водных объектов даны рекомендации по улучшению территориального мониторинга малых рек.

Благодарности. Автор искренне благодарит научного руководителя, д.г.-м.н., заведующую кафедрой минералогии и петрографии ПГНИУ Меньшикову Елену Александровну за научное сопровождение, ценные советы и помощь в реализации диссертационной работы. Автор выражает особую благодарность всем сотрудникам лаборатории экологической геологии ЕНИ ПГНИУ за помощь и поддержку в написании работы, сборе фактического материала и лично Д.М. Ширинкину и Л.Р. Золотарёва. Автор глубоко признателен за проведение аналитических исследований к.х.н. М.А. Волковой и А.Ю. Пузику, а также сотрудникам лаборатории гидрохимического анализа ПГНИУ и лично Е.Н. Копанцевой. Также автор благодарит зав.лаб. НИЛ биотехнологий ЕНИ ПГНИУ к.б.н. Л.Ю. Нестерову и старшего преподавателя кафедры зоологии беспозвоночных и водной экологии ПГНИУ А.В. Тиунова за консультации и помощь в проведении биотестирования. Автор признателен к.г.-м.н. В.П. Тихонову, к.г.-м.н. Т.И. Караваевой, к.б.н. П.Б. Михееву, к.б.н. Н.Н. Панькову, к.г.-м.н. П.А. Белкину, д.г.н. Е.А. Хайрулиной, к.г.н. О.А. Березиной, к.г.-м.н. Е.В. Дробининой за ценные советы и замечания, рекомендации и всестороннюю помощь при выполнении диссертационного исследования, также выражает благодарность всему коллективу кафедры динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ. Особые слова благодарности автор адресует своим родителям, всем родным и близким, за оказанную поддержку и всестороннюю заботу в ходе проведения исследований и написания диссертации, а также безвременно

ушедшим учителям на кафедре динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ – д.г.-м.н. В.Н. Катаеву и к.г.-м.н. И.В. Щуковой за прививание интереса к занятиям научной деятельностью.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ИЗУЧЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ

1.1 Малые реки: геохимия речных долин, экологические проблемы и современное состояние

В России насчитывается более 2,5 млн малых рек, которые играют важную экологическую роль в формировании гидрохимического и гидрологического режимов более крупных рек (Ткачев и др., 2002). Ухудшение эколого-геохимического состояния водных объектов урбанизированных территорий отмечается во всем мире, что связано с поступлением больших объемов промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных вод (Солдатова и др., 2022; Пасечник и др., 2021). При этом малые реки являются наиболее уязвимыми к техногенному загрязнению ввиду низкой способности к самоочищению, особенно при устойчивом техногенном воздействии в пределах водосборов урбанизированных территорий (Янчук, 2018).

Экологическое состояние малых рек связано с геохимическими условиями водосборов, а расположение урбанизированных территорий на них, включающих промышленные предприятия, городскую застройку и необходимую сеть транспортной инфраструктуры, увеличивает поступление различных загрязняющих веществ, в том числе токсичных металлов и металлоидов. На современном этапе речные водосборные бассейны в пределах урбанизированных территорий являются сложными, многокомпонентными и динамичными природно-техногенными системами, где наблюдаются интенсивное изменение землепользования, уменьшение лесистости, зарегулированность стока при создании водохранилищ на реках, размещение объектов накопленного вреда, наличие больших площадей с водонепроницаемым покрытием, что влияет на геохимические условия в речных долинах.

Состав речных вод связан с гидрологическими параметрами реки, подстилающими и водовмещающими горными породами территории речного бассейна, процессами выветривания, почвенно-ландшафтными условиями и интенсивностью эрозии почв, метеорологическими характеристиками (атмосферные осадки, температура и испарение) (Кузнецов, 1986). Поступление микроэлементов в реки также связано со склоновым, подповерхностным и подземным стоком, в результате чего происходит перераспределение химических элементов в водных объектах, где часть загрязняющих веществ аккумулируется в аллювиальных отложениях, а часть выносится водным потоком к базису эрозии (Савичев и др., 2020). При этом перенос и аккумуляция загрязняющих веществ в отложениях как в русловой, так и пойменной фации представляет потенциальную опасность первичного и вторичного

загрязнения тяжелыми металлами донных отложений и воды в разные фазы водного режима (Закруткин и др., 2020).

Скорость водного потока в реке определяет степень аккумуляции микроэлементов в аллювиальных отложениях. В настоящее время на урбанизированных территориях отмечается заиление русел малых рек, что приводит к снижению скорости потока, дальнейшему осаждению металлов и сорбции донными отложениями (Чалов и др., 2021). При отсутствии нарушения русловых процессов и естественном функционировании реки за счет высоких скоростей потока происходит вынос загрязняющих веществ, в частности металлов и металлоидов, в нижнюю часть водосбора, где происходит аккумуляция принесенного материала (Шинкарева, 2018).

При выполнении эколого-геохимических исследований наибольший интерес представляет тонкодисперсная фракция донных отложений (от 0,05 до $< 0,002$ мм), поскольку они наиболее легко переносятся водными потоками в нижнюю часть водосбора, при этом в местах седиментации эти отложения поглощают и удерживают значительное количество тяжелых металлов (Тихомиров и др., 2009). Во многих работах (Даувальтер, 2012; Abdallah, 2023 и др.) отмечалось, что увеличение концентраций тяжелых металлов имеют тесную корреляцию с уменьшением размера частиц за счет увеличения площади поверхности, емкости катионного обмена, повышения концентраций оксидов марганца и железа, органического материала и глинистых минералов, обладающих большой сорбционной емкостью.

Загрязнение поверхностных вод и донных отложений малых рек Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, и As оказывает негативное воздействие на водную биоту и проявляется в изменении нормального функционирования гидробионтов на различных уровнях трофической цепи (Корженевский, и др., 2021; Кораблина и др., 2022).

По данным Росгидромета и других исследований, в одном из крупнейших притоков р. Волги – р. Каме отмечается низкое качество вод, зафиксированное от верхнего до нижнего течения (<https://meteo.perm.ru/>, Любин и др., 2020). Суммарный вклад в загрязнение тяжелыми металлами р. Камы вносят малые реки, являющиеся приемниками точечного и диффузного загрязнения, где в пределах их водосборных территорий расположены промышленные и сельскохозяйственные объекты, селитебные территории городов Соликамска, Березники, Перми, Набережных Челнов, Нижнекамска, Нефтекамска (Шарафутдинов и др., 2020).

По данным ежегодного экологического доклада воды Камского водохранилища характеризуются превышением ПДК рыбохозяйственного значения по марганцу, железу общему, меди, а по удельному комбинаторному индексу (УКИЗВ) характеризуются как «очень

загрязненные» (Доклад..., 2021). Предприятия калийной, содовой и магниевой промышленности, составляющих ядро Соликамско-Березниковской агломерации, оказывает значительное техногенное воздействие на качество вод в верхней части Камского водохранилища (Любимова и др., 2019; Лепихин и др., 2019).

Рядом авторов (Лепихин и др., 1999) установлено, что суммарное годовое техногенное поступление металлов со стоком р. Толыч в Камское водохранилище составляет 99,2 т/год для титана, 10 г/год – меди, 9,9 т/год – хрома общего. При этом особенностью этой территории является формирование большой мощности техногенных отложений и содержания в них тяжелых металлов в период летней и зимней межени, а в период весеннего паводка происходит, не только размыв и вынос этих отложений, но и десорбция подвижных форм в водную среду. Таким образом, интенсивность миграции металлов в системе «вода ↔ взвеси ↔ донные отложения» в течение года в Камском водохранилище неравномерна.

Несмотря на большое количество проводимых исследований в акватории Камского водохранилища на участке от г. Соликамска до г. Березники, эколого-геохимическое состояние малых рек, являющихся приемниками сточных вод и впадающих в р. Камское водохранилище на этом участке, остается недостаточно изученным. Практически отсутствуют данные о содержании микроэлементов (Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, As) в поверхностных водах и донных отложениях, состоянии гидробионтов, которые отражают экологическое состояние малых рек, подверженных длительному техногенному воздействию. Все это ставит задачу определения уровня техногенного загрязнения микроэлементами малых рек Соликамско-Березниковской агломерации с использованием бассейнового подхода, сопоставлением полученных результатов с инструментами биоиндикации, что в итоге направлено на восполнение научных знаний и совершенствование методик в области экогеохимии.

1.2 Общая характеристика Соликамско-Березниковской агломерации

Район исследования расположен в северной части Прикамья на территории Соликамско-Березниковской агломерации (Пермский край) (рисунок 1.2.1). Эколого-геохимические исследования акваторий малых рек первого, второго и третьего порядков в левобережной части Верхней Камы проводились в период с 2014 по 2022 г.г. в пределах муниципального образования «Город Березники» и Соликамского городского округа.



Рисунок 1.2.1 – Расположение территории исследования

Исследуемые водотоки имеют рыбохозяйственное и рекреационное значение, а также являются источниками противопожарного водоснабжения (в частности р. Зырянка, где имеются Верхне-Зырянское и Нижне-Зырянское водохранилища). Водные объекты рыбохозяйственного значения на территории исследования имеют категорию от высшей до второй.

Развитие промышленности в Верхнекамье связано с открытием в 1925 г. Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Добыча калийной руды на Верхнекамском месторождении сыграла большую роль в социально-экономическом развитии этой территории и создании центра химической промышленности в городах Соликамск и Березники (Сидорова, 2010). Очень высокая техногенная нагрузка на водные объекты, в частности на малые реки, Соликамско-Березниковской агломерации связана с производством продукции горно-химической отрасли, которая является источниками точечного (задекларированного)

загрязнения – разрешенные сбросы сточных вод, так и диффузными (рассеянного) – фильтрационные стоки от шламохранилищ и солеотвалов, поступление высокоминерализованных рассолов в зонах провалов, самоизлив рассолов из старых рассолоподъемных скважин (Лепихин и др., 2020).

На сегодняшний день на территории Соликамско-Березниковской агломерации расположены ведущие предприятия химической, горнодобывающей и цветной промышленности России, развитие, которых на территории исследования началось в еще тридцатые годы двадцатого столетия. Градообразующие предприятия городов Березники и Соликамска – ПАО «Уралкалий», АО «Соликамский завод «Урал», АО «Соликамскбумпром», ОАО «Соликамский магниевый завод», филиал «Азот» АО «ОХК «Уралхим», «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ООО «Сода-Хлорат» и АО «Березниковский содовый завод», обеспечивают социально-экономическое благополучие данной территории, на которой в настоящее время проживают около 254 тыс. человек.

На левобережье р. Камы в пределах современной промышленной территории Соликамско-Березниковской агломерации расположены химические предприятия, работающие более 90 лет. И лишь на значительном удалении от Камской акватории, в бассейнах притоков 2 и 3 порядка находятся предприятия, начавшие работу последние 50 лет. Побочным продуктом химического производства является образование большого количества сточных вод, сброс, которых осуществляется в ближайшие к предприятиям водотоки. До 90-х годов прошлого века в городах Соликамск и Березники осуществлялся разрешенных сброс неочищенных сточных вод в малые реки. Так, минерализация вод такого объекта в этот период – р. Черной на территории г. Соликамска достигала 200 г/л (Горбунова и др., 1990, Бельтюков, 1996).

В настоящее время в верхней части Камского водохранилища на участке от г. Соликамска до г. Березники популярным видом рекреационной деятельности является рыбная ловля и отдых на воде. Водная рекреация включает в себя купание, греблю, катание на лодках, прием солнечных и воздушных ванн на берегу р. Камского водохранилища местным населением, рыболовная рекреация – активно пользуется спросом в летний и зимний периоды. При этом любительская рыбалка осуществляется как в Камском водохранилище, так и в устьях городских рек в районе Соликамско-Березниковской агломерации. Наличие достаточного количества действующих лодочных баз (г. Соликамск – 2, г. Березники – 8), оставшихся еще с советского периода, подтверждает активное использование местным населением водных объектов территории для этих целей.

1.3 Характеристика объектов исследования

Основными объектами данного исследования являются бассейны малых рек, впадающих в акваторию Камского водохранилища, на территории Соликамского городского округа (р. Усолка и р. Чёрная) и муниципального образования «Город Березники» (р. Толыч и р. Зырянка) Пермского края. Территория Соликамского городского округа преимущественно располагается в бассейне р. Усолки и в пределах р. Чёрной, которые являются притоками первого порядка Камского водохранилища (рисунок 1.3.1).

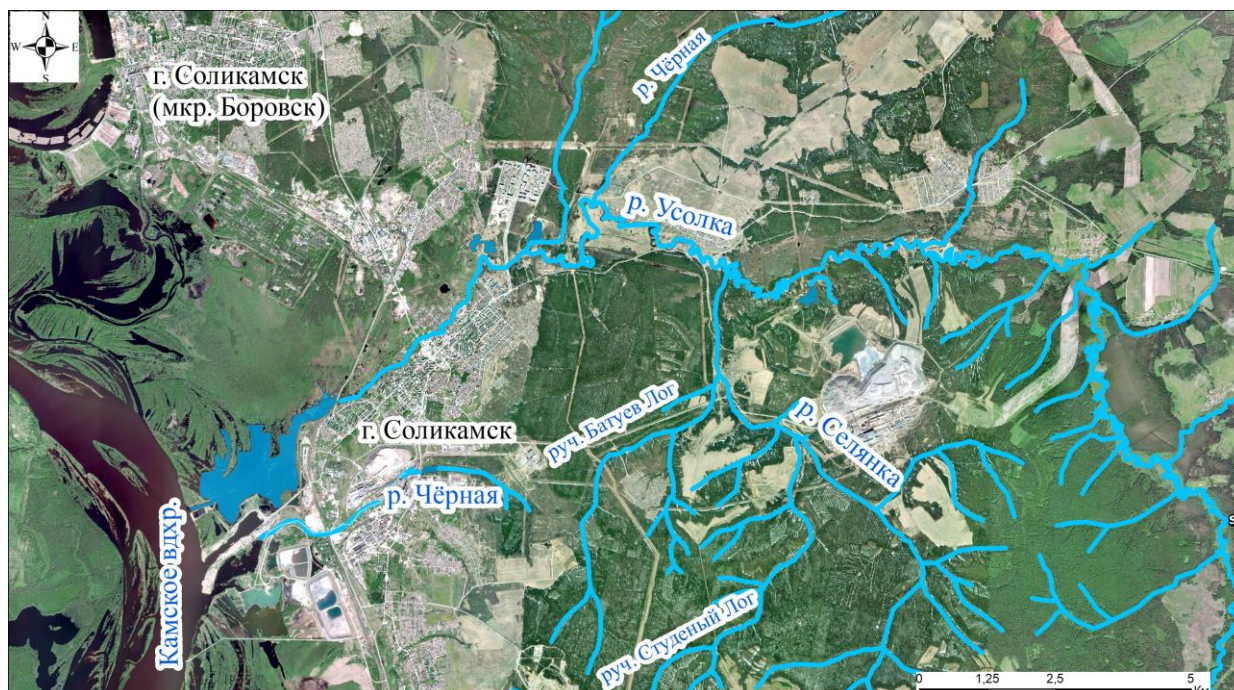


Рисунок 1.3.1 – Карта-схема расположения исследуемых акваторий на территории Соликамского городского округа

Река Усолка – левый приток Камы (Камского водохранилища), с общей длиной водотока – 57 км, площадью водосбора около 506 км². Высота водосбора р. Усолки изменяется от 108 до 251 м над уровнем моря. Река впадает в Камское водохранилище в черте г. Соликамска, берёт свое начало в болотном массиве в 25 км к юго-востоку от г. Соликамска, протекает сначала в северо-западном направлении, затем поворачивает на запад, а в низовьях в черте г. Соликамска – на юго-запад. Русло реки сильно меандрирует. В среднем течении реки в ее прибрежной части расположены д. Харюшина и с. Городище. Река принимает 46 притоков длиной менее 10 км, общей протяженностью 107 км. Крупными притоками р. Усолки являются р. Ростовица (впадает на 31 км от устья) и р. Селянка (впадает на 15 км от устья). Река Усолка в

основном протекает в заболоченных долинах и имеет типичный равнинный характер (рисунок 1.3.2). На исследуемой территории расположены также несколько водоемов и водотоков естественного и техногенного происхождения. Территория водосбора реки длительное время находится под влиянием горно-химического производства в средней части водосбора.



р. Селянка



р. Усолка

Рисунок 1.3.2 – Бассейн р. Усолки

Река Усолка относится к рыбохозяйственным водоемам первой категории. На реке и ее притоках развито любительское рыболовство. Ширина водоохраной зоны р. Усолки составляет 100 м.

Река Чёрная является левобережным притоком первого порядка р. Камы (Камского водохранилища), впадает в нее в верхней части г. Соликамска ниже промпорта ПАО «Уралкалий». Длина водотока составляет менее 10 км. Река берет свое начало в лесном массиве на юго-востоке г. Соликамска и далее протекает в субширотном направлении с востока на запад. В верховье реки устроен пруд, который оказывает регулируюшую роль на сток (рисунок 1.3.3А). Долина реки выше пруда представляет собой заболоченную пойму, заросшую кустарником и густой травянистой растительностью, в связи с чем, русло реки на данном участке не выражено, отмечены участки стоячей воды. В настоящее время р. Чёрная протекает в естественном состоянии только в верхнем течении до промышленных площадок ориентировочно на протяжении 5 км. В среднем течении река протекает по территории химических предприятий в подземном коллекторе общей протяжённостью ориентировочно 0,8 км. После выхода на дневную поверхность из коллектора сток р. Чёрной осуществляется по искусственно созданному спрямленному трапецевидному каналу, куда поступают стоки предприятий химической промышленности (рисунок 1.3.3Б). В рамках реализации проекта «Система отведения сточных вод предприятий г. Соликамска в Камское водохранилище» в

2017 г. в среднем течении реки организован канал в виде каменной наброски. Сброс сточных вод осуществляется через очистные сооружения механической очистки в Камское водохранилище (рисунок 1.3.4). В момент проведения эколого-геохимических исследований в 2014 г. сток р. Чёрной поступал в Камское водохранилище.



А)



Б)

Рисунок 1.3.3 – Верхнее и среднее течение р. Чёрной:

А – пруд на р. Чёрной в верхнем течении; Б – канал р. Чёрной в среднем течении

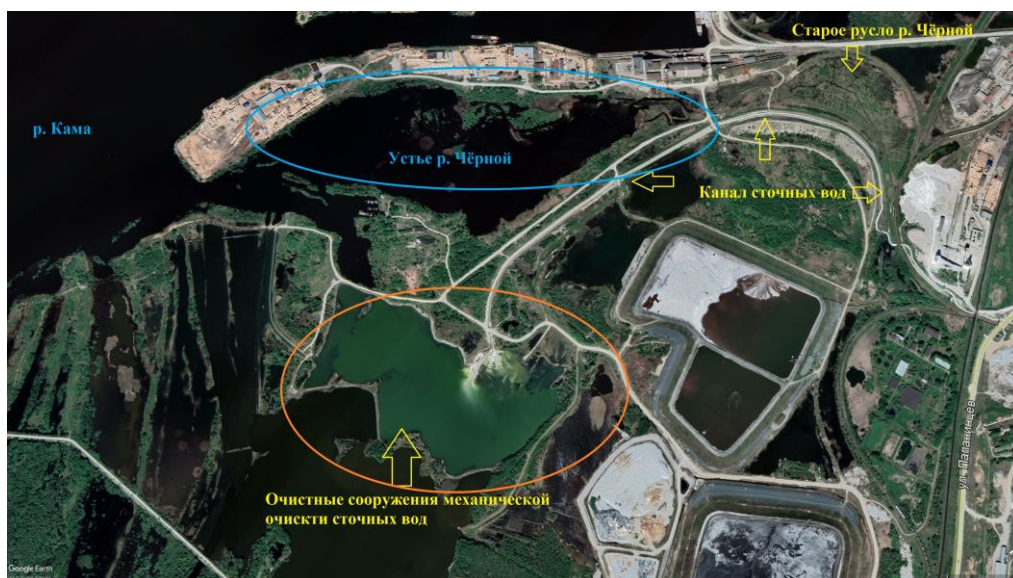


Рисунок 1.3.4 – Нижняя часть водосбора р. Чёрной, г. Соликамск

Река Чёрная относится к рыбохозяйственным водоемам второй категории. По данным ПермНИРО ихтиофауна в водотоке отсутствует в связи сильным техногенным воздействием. При этом в нижнем течении реки в подпоре Камского водохранилища в период открытой воды осуществляется любительское рыболовство. Ширина водоохранной зоны р. Чёрной составляет 50 м, в пределах которой исторически разместились предприятия горно-химической отрасли.

Муниципальное образование «Город Березники» расположен в пределах бассейна р. Толыч. С этим бассейном связаны промышленные зоны города в северной его части. С юга город опоясывает нижнее течение р. Зырянки. Эти реки являются притоками первого порядка р. Камы (рисунок 1.3.5).

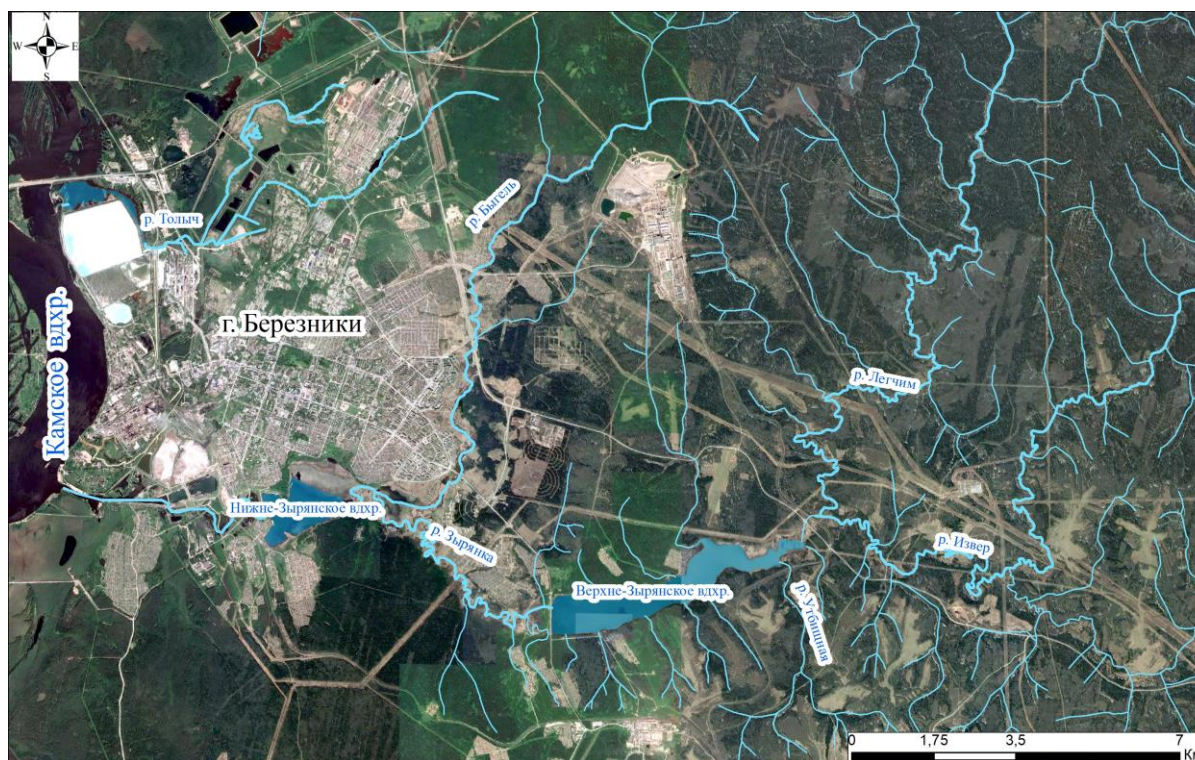


Рисунок 1.3.5 – Карта-схема расположения исследуемых акваторий на территории муниципального образования «Город Березники»

Река Толыч является притоком первого порядка р. Кама (Камское водохранилище), и относится к водным объектам рыбохозяйственного значения первой категории. Длина реки составляет 13 км, площадь водосбора – 36,1 км². Основным притоком р. Толыч является р. Затолыч (длина реки менее 10 км). Долина реки Толыч имеет высоту от 106 до 234 м над уровнем моря. Большая часть водосбора р. Толыч протекает по территории промышленной зоны г. Березники, где расположены предприятия цветной, энергетической и химической промышленности с их необходимой инфраструктурой (пруды-отстойники, шламонакопители, технологические автомобильные и железные дороги, трубопроводы) (рисунок 1.3.6). Исток реки находится в лесном массиве, только порядка 2 км от общей длины водотока протекает в естественных условиях. Нижняя часть водосбора реки спланирована, современное русло реки образовано с конца 60-х годов прошлого века в результате перепланировки промзоны г. Березники и переноса русла реки в нижнем течении.

Промышленное рыболовство на реках Толыч и Затолыч не осуществляется, при этом только в устьевой части р. Толыч развито любительское рыболовство. В соответствии со ст. 65 «Водного кодекса Российской Федерации», ширина водоохраной зоны р. Толыч составляет 100 м. В границах водоохранной зоны р. Толыч расположены большая часть промышленных предприятий, указанных выше.



Рисунок 1.3.6 – Нижнее течение р. Толыч (напротив шламонакопителя)

Река Зырянка является левобережным притоком р. Камы (Камского водохранилища), с общей длиной водотока – 53 км, площадь водосбора – 365 км². Река Зырянка начинается вместе слияния двух ее главных притоков рек Легчим и Извер (длина р. Зырянки – 19 км от места слияния и 53 км вместе с левым притоком р. Извер), и протекает в направлении с востока на запад по сильнопересеченной холмистой местности (рисунок 1.3.7). Река принимает 55 малых притоков (длина каждого менее 10 км) общей протяженностью 77 км. Наиболее крупными притоками р. Зырянки являются р. Талица (впадает на 32 км от устья), р. Легчим (впадает на 24 км от устья) и р. Быгель (впадает на 6,6 км от устья).



Рисунок 1.3.7 – Устьевая часть р. Зырянки

На р. Зырянке для технического водоснабжения предприятий Березниковского промузла создано 2 малых водохранилища – Верхне-Зырянское и Нижне-Зырянское (Семинский пруд). Начиная с акватории Нижне-Зырянского водохранилища, побережье занято дачными, садовыми участками и жилыми районами, ниже по течению на правом берегу расположена промзона, где находится участок затопленного калийного рудника.

На севере бассейн р. Зырянки примыкает к бассейну реки Усолки, на юге граничит с бассейном реки Ленвы (южная), на востоке – с бассейном реки Яйвы, на западе – с бассейнами малых рек, впадающих в Камское водохранилище. Поверхность бассейна представляет собой всхолмленную равнину. Средняя высота водосбора бассейна р. Зырянки – 180,5 м, максимальная высота – 261 м, минимальная – 109 м. Перепад высот составляет 152 м. Долина реки глубоко врежется в верхнепермские отложения. В долине р. Зырянки, хорошо выделяется пойма, 1-я надпойменная терраса и коренной склон. Коренные склоны долины имеют развитую овражно-балочную сеть.

Река Зырянка относится в рыбохозяйственным водоемам высшей категории. Промышленное рыболовство на реке не осуществляется, но местным населением проводится интенсивный любительский лов, особенно в Верхне-Зырянском и Нижне-Зырянском водохранилищах. Ширина водоохраной зоны р. Зырянки составляет 200 м. В нижнем течении реки р. Зырянки в границах водоохранной зоны исторически расположены промышленные предприятия и селитебная территория.

1.4 Природные условия Соликамско-Березниковской агломерации

1.4.1 Общая характеристика климатических, геоморфологических и гидрологических условий

Климат территории исследования умеренно-континентальный. Для нее характерны холодная продолжительная зима, теплое, но сравнительно короткое лето, ранние осенние и поздние весенние заморозки. По данным метеостанции Березники Пермского ЦГМС за 1966-2022 гг. самым холодным месяцем является – январь с температурой минус 14,7° С, самым теплым – июль со средней месячной температурой +18,0° С. Среднегодовая температура воздуха составляет +1,7° С. На территории исследования за год в среднем выпадает 665 мм атмосферных осадков. Максимальное количество осадков выпадает в июле. Годовое количество осадков превышает возможное испарение, поэтому увлажнение здесь избыточное, при величине годовой испаряемости 400-450 мм (Белкин, 2019; Максимович и др., 2012).

Рассматриваемая территория исследования расположена между 59°48' и 59°20' северной широты и 56°53' и 56°55' восточной долготы в бассейне Верхней Камы, на восточной окраине Восточно-Европейской равнины, имеет холмистый рельеф, для которого характерны возвышенные изрезанные междуречья и широкие речные долины с пологими террасированными склонами. Все реки исследуемого района имеют типичный равнинный характер.

Гидрографическая сеть полностью принадлежит к левобережной части бассейна р. Камы (Камское водохранилище). Абсолютные отметки рельефа территории исследования изменяется от 110 м (аккумулятивная равнина долины р. Камы, устьевые участки рек первого порядка) до 220 м (водораздельные пространства). Долины рек первого порядка простираются преимущественно в западном направлении.

Водный режим исследуемых малых рек Соликамско-Березниковской агломерации относится к умеренному типу (с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и длительной устойчивой зимней меженью) и характеризуется значительными колебаниями расходов воды в течение года, где техногенная составляющая в виде сбросов сточных вод оказывает значительное влияние на увеличение стока рек. В питании малых рек на территории исследования (исключая техногенный сток) большое значение играют атмосферные осадки, в первую очередь талые снеговые воды, а также дождевое и подземное питание.

Соотношение подземной и поверхностной составляющей стока существенно меняется по сезонам. Весной в поверхностном стоке почти исключительная роль принадлежит талым водам, поскольку в период весеннего половодья дождевые осадки, как правило, незначительны. Доля подземного стока составляет не более 10-15% от суммарного стока за сезон. Суммарный сток в период летне-осенней межени складывается на 50-60% из поверхностного стока и на 40-50% из подземного стока. Зимой реки питаются запасами подземных вод.

Реки на севере Прикамья в естественных ненарушенных условиях характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым и гидрокарбонатно-сульфатным составом вод (0,2-0,5 г/л). В зонах тектонических нарушений, в местах разгрузки подземных вод в виде крупных концентрированных родников и пластовых выходов, речные воды имеют гидрокарбонатно-хлоридный и хлоридно-гидрокарбонатный состав (до 1,0 г/л) (Комлев, 2011; Овчанкова, 2021; Белкин, 2019).

1.4.2 Общая характеристика геолого-гидрогеологических условий

Территория исследования характеризуется достаточной изученностью горно-геологических условий в связи с открытием Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) и последующей детальной разведкой участков недр, которые активно разрабатываются по настоящее время. Геологический разрез района ВКМКС делят на надсолевой и солевой комплексы пород. Ниже по опубликованным данным рассмотрена серия толщ разреза надсолевого комплекса пород ВКМКС – соляно-мергельная (нижнесоликамская подсвита (P_{1sl_2})), терригенно-карбонатная (верхнесоликамская подсвита (P_{1sl_1})) и пестроцветная (шешминская свита ($P_{1\check{s}\check{s}}$)), которые перекрываются четвертичными отложениями. На территории исследований под покровом четвертичных отложений залегают породы шешминской свиты ($P_{1\check{s}\check{s}}$), верхнесоликамской подсвиты (P_{1sl_1}) и нижнесоликамской подсвиты (P_{1sl_2}) уфимского яруса нижнего отдела пермской системы и лишь фрагментарно в долинах рек р. Усолка и р. Толыч представлена кустанайская свита (N_{2ks}) плиоценового отдела неогеновой системы (рисунок 1.4.2.1) (Кудряшов, 2013).

Нижнесоликамская подсвита (P_{1sl_1}) сложена в основном мергельями, глинами и каменной солью с прослоями сульфатных пород, мощностью до 141 м. Мощность бессолевой части соляно-мергельной толщи в среднем составляет 86 м. Наличие островных участков выхода соляно-мергельной толщи, не перекрытой более молодыми отложениями терригенно-карбонатной толщи, свидетельствует о наличии локальных купольных структур.

Верхнесоликамская подсвита (P_{1sl_2}) сложена карбонатными и терригенными породами с мощностью до 140 м. Карбонатные породы представлены от чистых известняков до известковой глины. В терригенно-карбонатной толще встречаются прослой гипса и ангидрита, а по карбонатным породам развита доломитизация. Разрезы бывают как преимущественно карбонатные, так и преимущественно глинистые.

Ранее проведенные исследования микроэлементного состава терригенно-карбонатных пород соликамских отложений (Калинина и др., 2016) свидетельствуют, что на основании средних значений наибольшие концентрации зафиксированы по Ti, Sr, Mn, Ba, V, Ni, Cr, Zr, Rb, Cu, Zn, при этом для сульфатных пород имеется следующее распределение элементов: $Zn > Sr > Mn > Ti > Ni$.

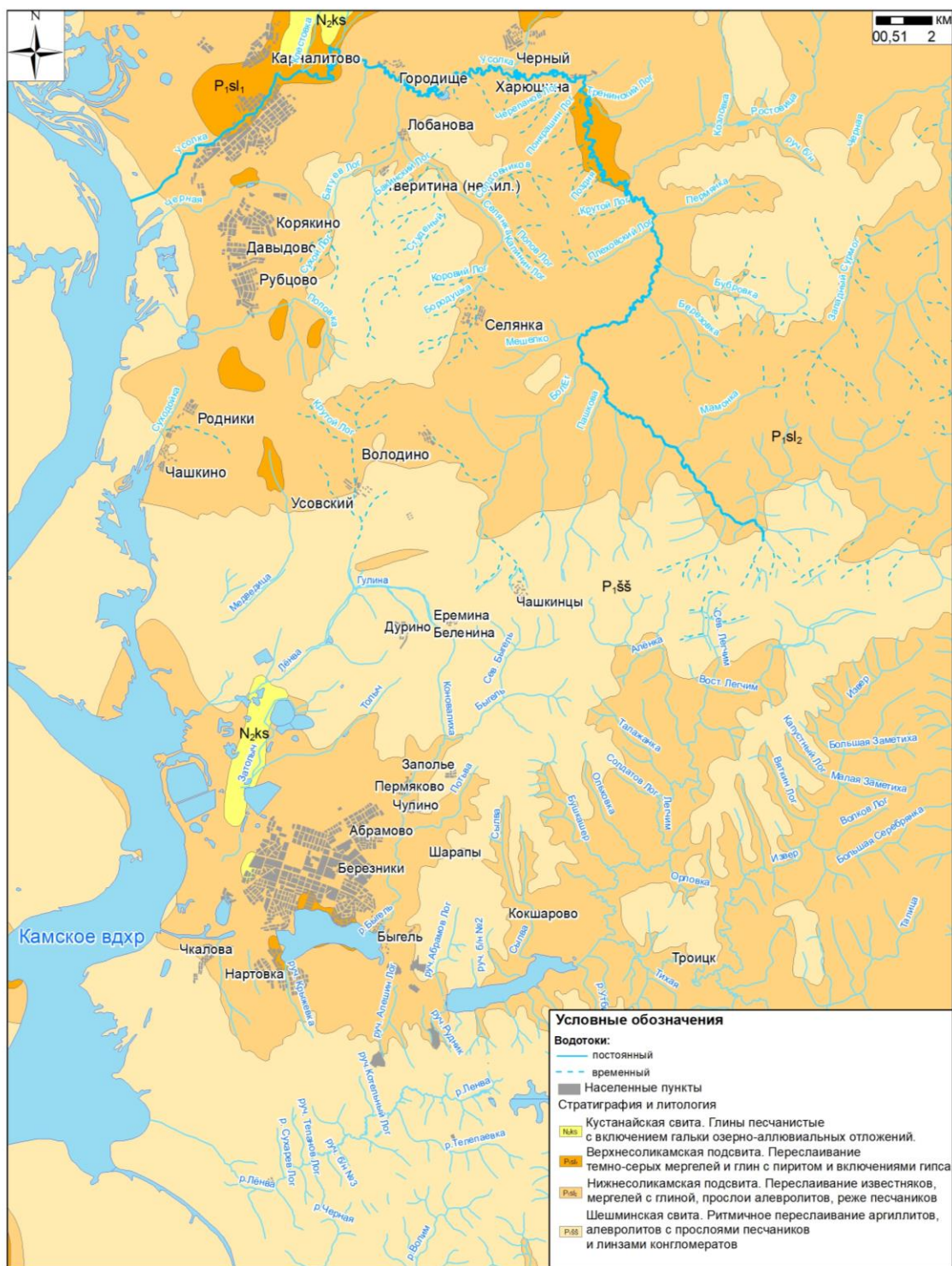


Рисунок 1.4.2.1 – Геологическая карта территории исследования по данным Т.В. Харитонов (2002)

Шешминская свита (P₁ss) сложена в основном песчаниками, алевролитами, глинами, конгломератами мощностью до 46 м. Песчаники и алевролиты известковистые, косослоистые, нередко в пестроцветной толще встречаются медистые соединения в виде малахита и азурита.

Встречаются линзовидные прослои согласных и секущих прожилков гипса (Баяндина, 2017). В большей степени шешминские песчаники состоят из обломков различных пород (от зерен до 60%): кремнистые, глинистые, эффузивы, сланцы и кварциты, а также полевых шпатов, хлорита, кварца и пироксена (Трапезников, 2018).

Кустанайская свита (N_2ks) залегает на верхнепермских породах и перекрыта отложениями озерно-аллювиальной соликамской свиты нижнего плейстоцена. Отложения свиты на территории исследования располагаются локально в долинах реки Камы. Скважинами вскрыты два типа разреза кустанайской свиты: аллювиальный и озерно-аллювиальный. В осевой части Березниковской погребенной долины залегают породы аллювиального типа, представленные серым, желтовато-бурым глинистым разнотерным песком с галькой и щебнем зеленовато-серых известняков и бурых песчаников. Отложения кустанайской свиты озерного типа развиты в бассейне р. Усолки в Клестовской древней озерной ванне и представлены темно-серой, серой, известковистой, гумусированной глиной с включениями растительного детрита (Трапезников, 2018).

Четвертичные отложения (Q) в пределах промышленной-урбанизированной территории представлены техногенными образованиями, на ненарушенной территории – болотными, аллювиальными, флювиогляциальными и элювиальными. Общая мощность четвертичных отложений на территории исследования меняется от 0,3 м до 25 м, составляя в среднем 10 м.

Болотные отложения распространены в пределах террас р. Камы, они представлены торфами мощностью до 5 м, отложения темно-коричневого цвета, средне- и хорошо разложившийся, местами с плохо перегнившими кусками древесины, влажные и водоносные.

Аллювиальные и флювиогляциальные отложения сложены суглинками, супесями, песками и гравийно-галечниковыми отложениями, элювиальные отложения – суглинками, глинами и щебнисто-дресвяными отложениями. Выходы гляциальных отложений днепровского горизонта закартированы в верховьях р. Потымки бассейна р. Боровой в четырех километрах северо-восточнее долины р. Усолки.

Техногенные отложения представлены насыпными грунтами неоднородными по литологическому составу, площади и мощности распространения – аллювиальными, глинистыми, песчаными, супесчаными и гравийно-галечниковыми грунтами с включением щебня известняка, обломков кирпичей и древесины (до 20-25%) с разной степенью давности отсыпки.

Территория исследования расположена в пределах центральной части Соликамской впадины, где ее значительную часть занимает Верхнекамское месторождение солей, одно из

крупнейших месторождений по запасам калия в России и мире (Трапезников, 2018). В пределах района исследования расположена такая положительная тектоническая структура как Березниковский вал, который пересекает эрозионный врез р. Зырянки. В результате чего осуществляется поступление минерализованных вод из глубоких горизонтов по трещинным зонам к поверхности, что особенно характерно для береговой зоны Нижне-Зырянского водохранилища (рисунок 1.4.2.2 и рисунок 1.4.2.3) (Максимович и др., 2012).

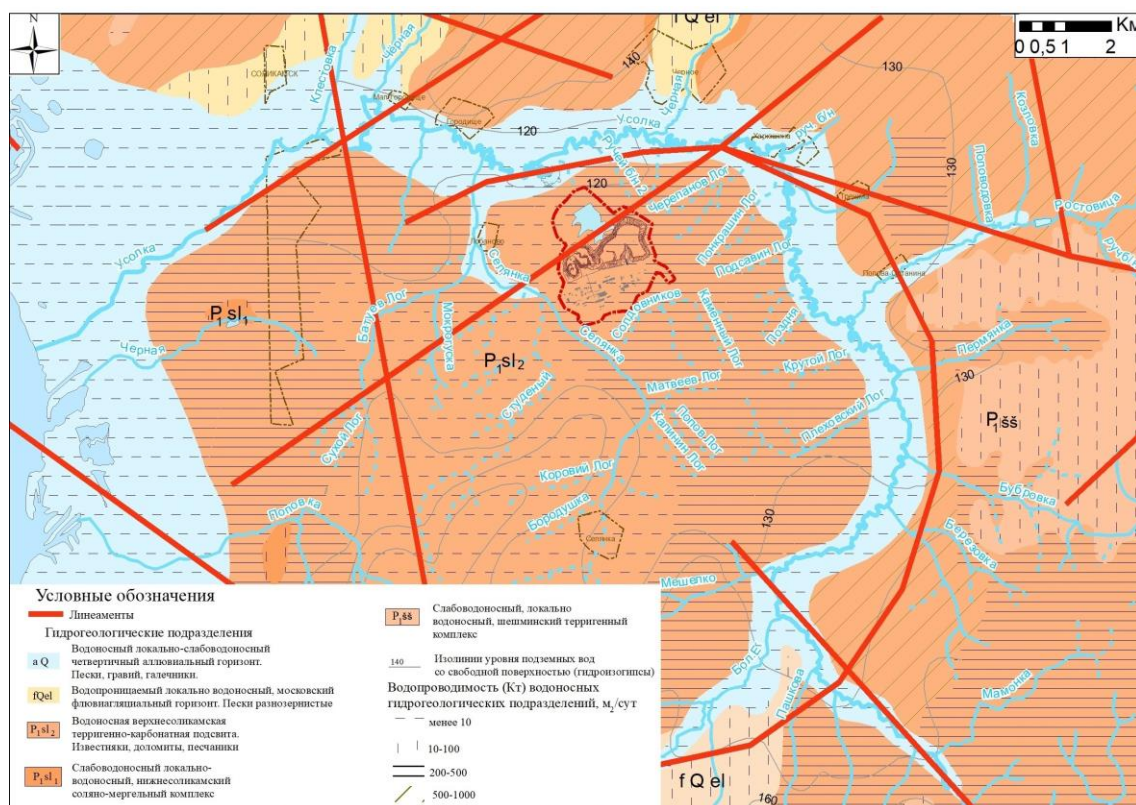


Рисунок 1.4.2.2 – Гидрогеологическая карта с линеаментами
(Соликамский городской округ) по данным Т.В. Харитонов (2002)

При подземной отработке калийных руд за счет опускания земной поверхности формируется техногенная трещиноватость пород геологического разреза, которая увеличивает фильтрацию и миграцию рассолов из шламохранилищ и отстойников, приводящую к засолению поверхностных и подземных вод, а также почвогрунтов прилегающих к объектам размещения отходов калийной промышленности (Белкин, 2019).

Родниковая разгрузка в долинах исследуемых рек осуществляется из водоносных комплексов уфимского яруса нижнего отдела пермской системы. Формирование химического состава подземных вод связано с влиянием природных факторов (литологического состава

пород, структурно-тектонических и гидродинамических условий), а также техногенного воздействия (влияние шламохранилищ, солеотвалов и прудов-отстойников) (Белкин, 2020).

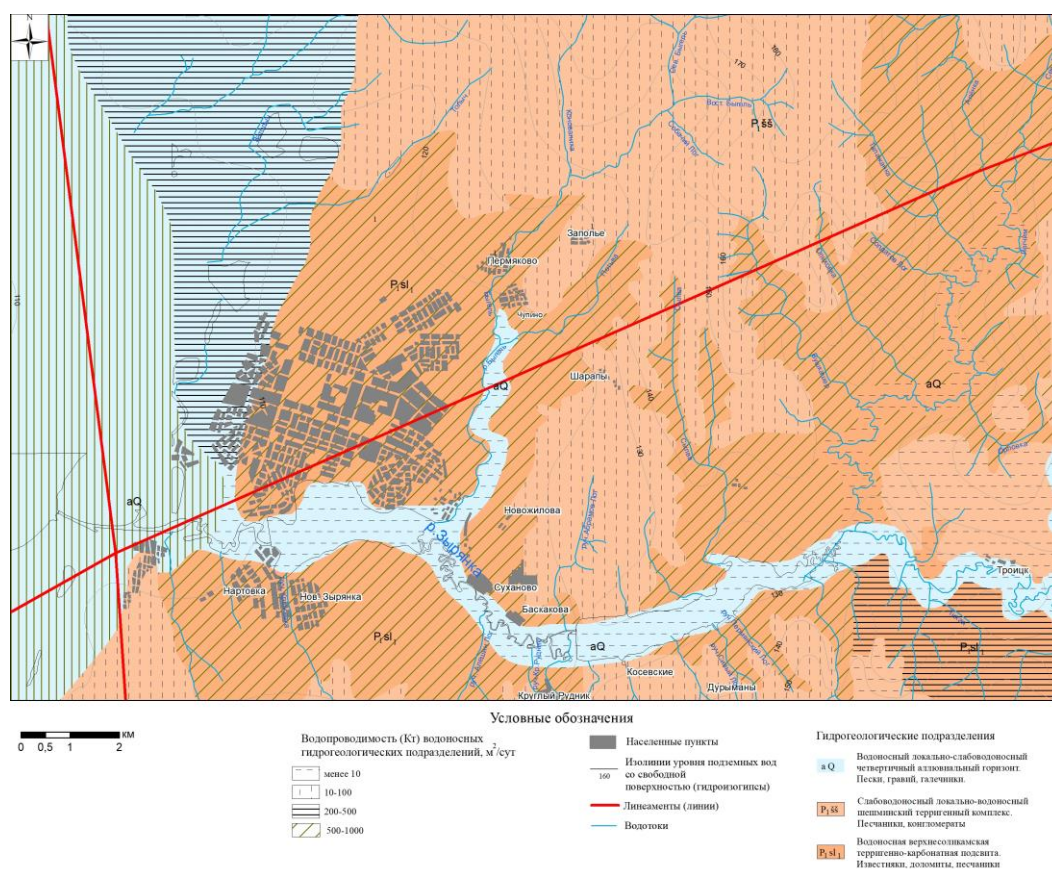


Рисунок 1.4.2.3 – Гидрогеологическая карта с линеаментами территории муниципального образования «Город Березники» по данным Т.В. Харитоновой (2002)

Разгрузка родников из терригенно-карбонатной толщи характеризуются пресными водами с минерализацией до 0,3 г/л, из верхнесоликамского водоносного горизонта воды солоноватые с минерализацией до 3 г/л, родники, разгружающиеся из нижнесоликамского водоносного горизонта, характеризуются солеными водами с минерализацией до 30 г/л (Максимович и др., 2012).

1.5. Источники и виды техногенного воздействия на окружающую среду Соликамско-Березниковской агломерации

Техногенное воздействие на водные объекты в пределах Соликамско-Березниковской агломерации формируется преимущественно за счет точечных декларируемых источников загрязнения, а также не декларируемых рассредоточенных (диффузных) источников, к которым

относятся сток с поверхности водосбора промышленных площадок и зон транспортной инфраструктуры, подземные воды и фильтрационные разгрузки из действующих и законсервированных шламохранилищ и накопителей жидких и твердых отходов, судоходство (Лепихин и др, 2021; Лепихин и др., 2020). Также значительный вклад в поступление микроэлементов в малые реки на территории городов Соликамска и Березники вносит родниковая разгрузка разного генезиса, поступление минерализованных вод в приповерхностную гидросферу через старые рассолоподъемные скважины.

Декларируемые источники загрязнения. Характерной особенностью водоотведения в городах Соликамске и Березники является поступление сточных вод от водопользователей до Камского водохранилища по системам малых водотоков. Основные водотоки, транспортирующие сточные воды в г. Соликамске – канал сточных вод в русле р. Чёрной. В г. Березники основным коллектором сточных вод является промышленный канал, проложенный по старому руслу р. Зырянки и р. Толыч, по которому транспортируется свыше 85% объема всех сточных вод города (Лепихин и др., 2008; Ушакова и др., 2023). Другой значительной транспортной артерией сточных вод в г. Березники является р. Толыч.

Декларируемый перечень загрязняющих веществ в сточных водах водопользователей, поступающий в исследуемые малые реки Соликамско-Березниковской агломерации от промышленных предприятий разных отраслей и предприятий коммунального хозяйства, значительно варьирует. Так водопользователи г. Березники декларируют сброс по 45 различным загрязняющим веществам, а в г. Соликамске этот перечень составляет 25 веществ. Основными лимитирующими загрязняющими веществами являются: макрокомпоненты (в первую очередь хлориды, ионы калия, натрия, магния); органические вещества (флотореагент талловый, нефтепродукты), оцениваемые через показатели ХПК и БПК; индивидуальные показатели (соединения азота); ряд металлов (в первую очередь титан, медь, ванадий, железо, марганец).

Изменение качества вод Камского водохранилища на участке от г. Соликамска до г. Березников происходит в результате прямого сброса сточных вод в Камское водохранилище от следующих водопользователей: ООО «Соликамская ТЭЦ», АО «Соликамский завод «Урал», ООО «Водоканал», АО «Соликамскбумпром», ПАО «Уралкалий», АО «Березниковский содовый завод», ООО «Березниковская водоснабжающая компания», и ООО «СТОК» (<https://kambvu.ru/>). При этом в Камское водохранилище только в 2021 году сброшено 57 млн м³ недостаточно очищенных сточных вод, а нормативно очищенных после биологической и механической очистки – 18 млн м³ и 13 млн м³, соответственно. Предприятиями с наибольшими объемами водоотведения за последние пять лет в г. Березники являются ООО «Сток»

(59 млн м³) и ОАО «Березниковский содовый завод» (36,7 млн м³), а в г. Соликамске – АО «Соликамскбумпром» (27,7 млн м³) (Доклад..., 2021).

Фильтрационные разгрузки с территорий размещения отходов. Город Березники и Соликамский городской округ являются лидерами по образованию отходов в Пермском крае и в 2020 году здесь образовано 22,8 млн т и 14,8 млн т отходов, соответственно. Увеличение объемов образования и размещения отходов на территории этих городов связано с предприятиями по производству удобрений и азотных соединений, добыче минерального сырья для химической промышленности, производству прочих основных неорганических химических веществ, производству прочих цветных металлов, бумаги и картона (Доклад..., 2021). Складирование и хранение отходов на территории исследования осуществляется в шламохранилищах (размещение глинисто-солевых шламов), солеотвалах (галитовые отходы), рассолосборниках, шламонакопителе содовых отходов (шламовое «Белое море»), техногенном объекте «Голубое озеро» (старый шламонакопитель), промканале открытого типа, действующих и законсервированных прудах-отстойниках. На основании проведенных исследований (Бачурин, 2006; Савон и др., 2016) основными источниками загрязнения верхней зоны аэрации и приповерхностной гидросферы на рассматриваемой территории являются крупнотоннажные галитовые отходы и глинисто-солевые шламы, приводящие к поступлению высоких концентраций солей и микроэлементов.

По химическому составу галитовые отходы в основном состоят из хлорида натрия (до 85%), также в небольших количествах присутствуют хлориды кальция и магния, нерастворимый (глинистый) осадок и вода. Глинисто-солевые шламы представляют собой суспензию растворимых и нерастворимых в воде частиц в водно-солевом растворе (Князев и др., 2016). Установлено, что бо́льшая часть содержащихся в калийных рудах токсичных микроэлементов и металлов в процессе их переработки переводится в глинисто-солевые шламы, сбрасываемые в шламохранилища. Это касается, в первую очередь, сидерофильных (Fe, Ni) и литофильных (Mn, V, Ti) элементов, содержащихся в калийных рудах преимущественно в виде таких труднорастворимых минералов, как хлорит, пирит, гематит, гидрослюда, что определяет концентрацию их основного количества (87–99%) в нерастворимом остатке руд (Бачурин и др., 2017).

Воздействие фильтрационных вод (рассолов) отвально-шламового хозяйства калийных предприятий фиксируется в долинах малых рек Волим, Быгель, Черная, а также р. Каме (Пахоруков и др., 2021; Юй, 2012). Известны примеры ухудшения барьерных свойств глинистого экрана в основании бортов и ложа шламохранилищ, которые приводят к

формированию фильтрационных вод $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ состава, поступление которых в водные объекты приводит к увеличению минерализации речных вод – до 12 г/л в р. Ленве (Хайрулина, 2018).

Ранее проведенные исследования показали, что в результате диффузного загрязнения на участке Камского водохранилища только в районе г. Березники в год при средней интенсивности поступает порядка 161 кг/с минеральных солей с наибольшим приносом хлоридов (Лепихин и др., 2020). При этом наблюдается формирование вертикальной неоднородности водных масс, что связано с не декларированными латентными источниками минерализованных вод (Богомолов и др., 2021).

Также одним из техногенных объектов, из которого возможно диффузное поступление загрязняющих веществ в исследуемые объекты, является зона провала на руднике Первого Березниковского калийного рудоуправления, расположенного приустьевой части р. Зырянки (в зоне подпора Камского водохранилища). При затоплении в рудник вначале поступают слабоминерализованные воды, а затем пресные. Процессы взаимодействия вод с соляными породами, залегающими выше обрабатываемых пластов, приводят к росту минерализации этих вод до категории рассолов (Борзаковский и др., 2012; Барях и др., 2009).

Родниковая разгрузка. В пределах территории исследования зафиксирована техногенная трансформация химического состава подземных вод в районе добычи, переработки калийных руд и складирования галитовых отходов. Высокоминерализованные фильтрационные стоки шламохранилищ и солеотвалов проявляются в первую очередь в увеличении минерализации подземных вод с доминированием в ионном составе Cl^- , Na^+ и K^+ , среди микрокомпонентов преобладают галогены, щелочноземельные и щелочные металлы, а также тяжелые металлы (Белкин и др., 2018; Максимович и др., 2016). При этом повышение уровня минерализации (до 30 г/л) наблюдается в береговой зоне Нижне-Зырянского водохранилища, где зафиксирована серия соленых родников, связанных с перетоками подземных вод на поверхность из соляно-мергельной толщи (нижнесоликамская подсвита (P_{1sl_2})), терригенно-карбонатной толщи (верхнесоликамская подсвита (P_{1sl_1})) (Максимович и др., 2012). Индикаторами изменения химического состава родникового стока в районе объектов калийной промышленности являются высокое содержание Cl^- , Br^- , Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , Se, Sr, Ba, As (Белкин, 2018).

Самоизлив из старых рассолоподъемных скважин. Соляной промысел на территории Верхнекамья зародился еще в XV веке сначала на реке Боровой выше по течению села Верх-Боровского (севернее г. Соликамска) (Богданов, 2014). В пределах современной территории Соликамско-Березниковской агломерации существовало более 200 рассолозаборных скважин, входивших в состав следующих промыслов: Верхне-Боровской, Пыскорский, Орловский, Яйвенский, Дедюхинский, Соликамский, Ленвенский, Березниковский, Новоусольский,

Боровской, Усть-Усольский, Усть-Боровской. Масштабы распространения соляного промысла на территории Верхнекамья представлены на рисунке 1.5.1.

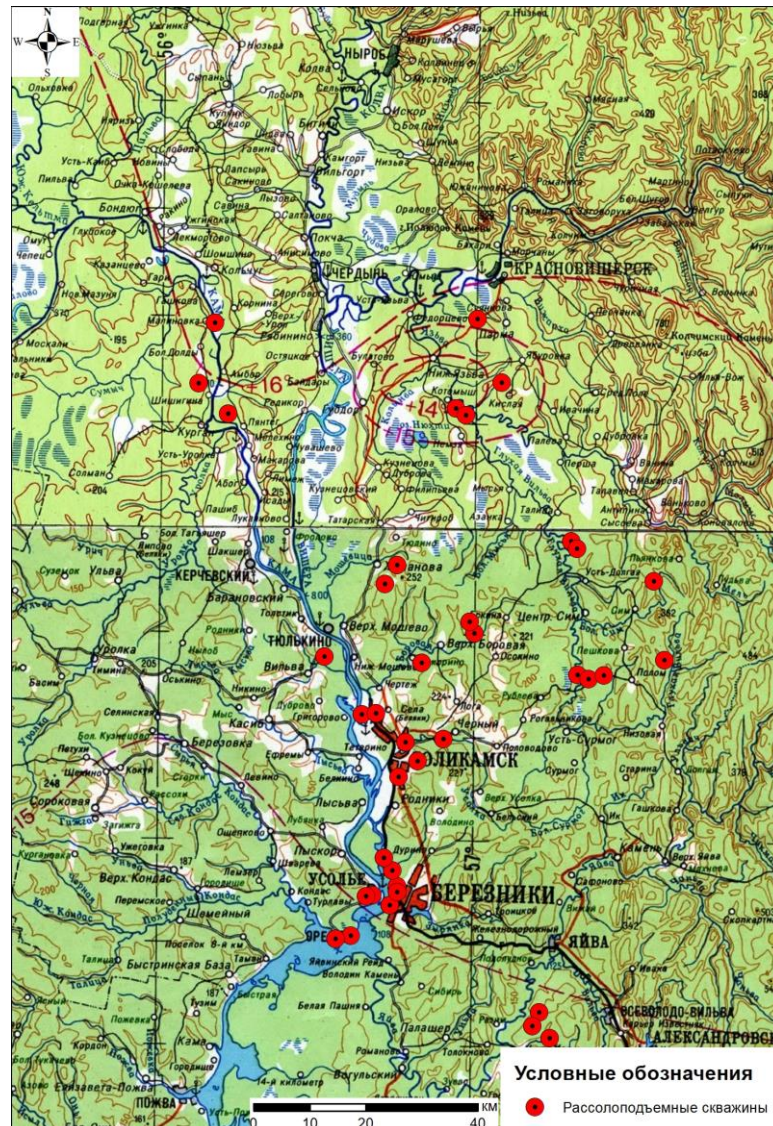


Рисунок 1.5.1 – Расположение старых рассолоподъемных скважин на территории Верхнекамья по данным М.В. Богданова (2014)

Соляной рассол (100-300 г/л) извлекали из скважин, укрепленных деревянными трубами, над которыми стояли высокие бревенчатые срубы рассолоподъемных башен в период с 1430 г. по 1970 г. (Хайрулина и др., 2017; Бельтюков, 2000). Большая часть рассолопромыслов на начальном этапе эксплуатировала естественные рассолы, приуроченные к контакту глинисто-мергелистых пород с покровной толщей или даже карналлитовой зоной. Позже рассольные скважины доходили до калийных и каменных солей до глубины 125 м, глубина отдельных рассолоизвлекающих скважин достигала 267 м.

В настоящее время большая часть старых соль-заводов и промыслов Ленвенского, Дедюхинского, Зырянского, Березниковского и др. затоплены водами Камского водохранилища после строительства Камской ГЭС. В результате создания водохранилища уровень рек на территории Соликамско-Березниковской агломерации увеличился и все реки находятся в подпоре. Имеются случаи самоизлива рассола (4 л/с) восходящими струями из рассолоизвлекающей скважины, расположенной под водой (р. Мошевица, д. Верхнее Мошево) (Максимович, 1969).

Большая часть рассолоподъемных скважин на Соликамских промыслах находились по обоим берегам р. Усолки, самая дальняя – в 24,5 км от устья. Есть сведения, что скважины располагались как у уреза воды, так что трубные клетки соприкасались с водой, также трубы стояли непосредственно в реке, были и отдельные скважины, пройденные на значительном расстоянии от реки. Самые глубокие скважины в связи с относительно неглубоким залеганием каменной соли здесь были не более 100 м. В настоящее время на левом берегу р. Усолки сохранилась Людмилинская рассолоподъемная скважина (рисунок 1.5.2), из которой осуществляется самоизлив рассолов в виде ручья, впадающего в р. Усолку на 7,3 км от устья. При этом по архивным данным (Максимович, 1969) на правом берегу р. Усолки на расстоянии 110 м от Людмилинской скважины были расположены – Анфиногеновская труба, а в 150 м – Никольская скважина. Ниже по течению от Людмилинской скважины были расположены Александровская и Петровская скважины.



Рисунок 1.5.2 – Людмилинская рассолоподъемная скважина

Место разгрузки холодных хлоридно-натриевых рассолов Людмилинской скважины представляет собой зону современного минералообразования. На этом участке отмечены

микронные выделения самородных фаз следующих элементов (Cu, Ag, Ni), сульфидов (Cu, Ag, Ni, Fe), сульфохлоридов (Cu, Ag, Ni), хлоридов (Ag, Cu), барита и сахамалита (Ce). Микроэлементный состав рассолов формируется в нижней части надсоляной (соляно-мергельной) толщи, обогащенный сидерофильными (Co, Ni), литофильными (Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, W, Th) и халькофильными элементами (Zn, Ge, As, Se, Sn, Sb, Bi, Pb, Tl), которые с изливающимися рассолами поступают в бассейн р. Усолки (Чайковский и др., 2019).

В настоящее время старые рассолоподъемные скважины Ленвенских и Дедюхинских соль-заводов и промыслов, расположенные в пределах современного (перенесенного) русла р. Толыч и в пределах нижней части водосбора реки перед впадением в Камское водохранилище, затоплены или находятся под шламонакопителем. На Дедюхинском заводе количество рассолоподъемных скважин составляло 14, глубиной от 95 м до 194 м, а на Ленвенском заводе – 37 скважин глубиной от 92 м до 200 м (Максимович, 1969).

Соляные промыслы были и в долине р. Зырянки. Количество рассолоподъемных труб в разные периоды значительно варьировалось, только в расцвет Зырянского промысла было 23 рассолоподъемные трубы и 39 варниц. В настоящее время остатки 23 рассолоподъемных труб в устье р. Зырянки затоплены (Максимович, 1969). Современное русло р. Зырянки значительно отличается от его исторического. Так при создании Камского водохранилища было принято решение о переносе русла в рамках защитных мероприятий от подтопления промышленных предприятий, расположенных на левом берегу р. Камы в г. Березники (Ушакова и др., 2023). Расположение рассолоподъемных скважин на верхних промыслах на р. Зырянке в связи с заполнением Нижне-Зырянского водохранилища неизвестно.

В связи с тем, что тампонаж скважин отсутствовал, существующая водоизоляция с течением времени нарушалась и скважины становилась проводником слабоминерализованных вод в подземные и поверхностные воды (Максимович, 1969). Участки с изливающимися рассолами хлоридно-натриевого состава оказывают значительное воздействие на химизм аквальных экосистем в долинах рек, на этих участках наблюдается возникновение вторичных солончаков с сульфатно-хлоридным натриевым типом засоления, что свидетельствует о существенной трансформации почвенно-растительного покрова (Хайрулина и др., 2021).

Исследованиями (Максимович и др., 2012; Khayrulina et al., 2022) отмечено влияние перетоков минерализованных вод на территории ВКМКС на приповерхностную гидросферу через старые рассолоподъемные скважины с минерализацией рассола 100-300 г/л и родниковую разгрузку, которая поступает субаквально в пределах береговой зоны в речных долинах, в связи со структурными, гидрогеологическими, техногенными факторами.

Поверхностный сток с территории водосбора. Источником техногенного воздействия на водные объекты в пределах Соликамского-Березниковской агломерации является и поверхностный сток с территории водосбора. Так, несоответствующее санитарно-гигиеническим нормативам качество почв на территории водосборных площадей урбанизированных территорий предопределяет повышенное содержание тяжелых металлов в поверхностном стоке при его движении по поверхности водосбора к водным объектам. Отсутствие системы отвода ливневого стока и его очистки в современных городах, позволяет считать поверхностный сток, поступающий с промышленных и урбанизированных территорий реальной экологической угрозой для природных водных объектов (Сабанаев и др., 2016).

Химический состав талых снеговых вод на территории исследования характеризуется трансформацией макро- и микроэлементного состава в зависимости от специфики функционального зонирования территории (промышленная, транспортная, жилая или рекреационная зоны). По данным усредненных характеристик талых снеговых вод на территории г. Березники для промышленной зоны характерен $K^+-Na^+-Cl^-$ тип вод, для рекреационной зоны – $Ca^{2+}-HCO_3^-$, для селитебной зоны – $Ca^{2+}-NO_3^-HCO_3^-$, для транспортной зоны – $Na^+-HCO_3^-$ (Хайрулина и др., 2020).

Эколого-геохимическое распределение элементов в снежном покрове на территории муниципального образования «Город Березники» демонстрирует повышенную техногенную нагрузку мест досугового пребывания людей относительно промышленных территорий города. За последние 10 лет в талых снеговых водах на высоком уровне по-прежнему остались содержание Pb, Ti, Ni (Ушакова и др., 2020). По результатам исследования состава снеговых вод на территории городов Березники и Соликамск (Ushakova et al., 2021) в них зафиксированы превышения по Mn, Cu, W, W, Se, Zn и V относительно нормативов качества воды рыбохозяйственных водоемов, что позволяет рассматривать их источником загрязнения местных речных систем в период снеготаяния.

Источниками поступления микроэлементов в снежный покров в зимнее время является атмосферное осаждение примесей, автомобильный транспорт и противогололедные реагенты. В зимний период времени уборка снега с проезжей части и тротуаров во многих странах мира осуществляется с помощью противогололедных реагентов. Только в Канаде ежегодно используется около 5 млн т дорожной соли, в Китае – 600 тысяч т в год, в Швеции в среднем 240 тысяч т в год, только на территории Москвы ежегодно используют до 400 тысяч тонн твердых и жидких противогололедных реагентов (Antonson et al. 2021; Rødland et al. 2020; Лысыков, 2017). При этом в противогололедных реагентах, применяемых в России (данные по «Галит А» и песко-соляной смеси), отмечаются высокие концентрации Zn, Mn, Ba, V, Rb, Sr и

Mn, Ba, Cr, V, Sr, Ni, соответственно. Об этом свидетельствуют высокие концентрации микроэлементов в талой воде снежных куч, сформированных с территории проезжей части в г. Перми (Пермский край) (Ushakova et al., 2023).

Активное поступление многих элементов в снежный покров и поверхностный сток происходит в пределах проезжей части за счет влияния автотранспорта. Так, за счет контакта с шинами подтверждено поступление Al, Zn, Ca, Cd, Co, Cu, Mn, Pb, W; Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Zn, Ba, Fe, Mo – за счет тормозных механизмов; Cr, Ni, Fe, Zn – износа двигателя и кузова; Pb – краска кузова; Cu, Ag, Ba, Cd, Cr, Co, Mo, Ni, V, Sb, Sr, Zn – связаны с выхлопами двигателей внутреннего сгорания (включая дизельные); Al, Fe, Pb, Si, Sr, Ti – могут содержаться в дорожном покрытии (асфальт, битум) (Adamiec et al. 2013; Meland, 2010; Müller et al. 2020).

Проведенные исследования содержания тяжелых металлов в почвах на участках расположения объектов транспортной инфраструктуры в пределах промышленной зоны г. Березники свидетельствуют о категории загрязнения от умеренно до опасной по суммарному показателю загрязнения Zс, опасной категории на основании кратности превышения ПДК по тяжелым металлам (Ушакова и др., 2020; Ушакова и др., 2022). Это позволяет рассматривать поверхностный сток, сформированный на водосборных площадях урбанизированных территорий, как значимый дополнительный источник поступления микроэлементов в акваторию малых рек – Усолка, Чёрная, Толыч и Зырянка.

1.6. Гидрохимические и гидробиологические исследования на севере Прикамья

Бассейны рек в областях с гумидным климатом имеют важное значение для современного континентального осадконакопления, осуществляемого под влиянием природно-климатических и техногенных факторов (Меньшикова, 2015, Осовецкий и др., 2006). Современная седиментация на различных участках рек связана с переносом вещества и осаждением обломочного материала, поступающего с дождевыми и талыми водами с водосборных площадей, за счет размыва берегов. Наряду с твердым стоком, вещество поступает в виде коллоидов и истинных растворов (Ежова, 2014).

Экологическое состояние верхней части Камского водохранилища. Согласно государственному докладу на территории России наблюдается уменьшение объёмов сброса сточных вод в водные объекты (О состоянии..., 2020). Так, суммарный объем стоков в 2021 г. составил 35 539,8 млн м³, из них нормативно очищенных 2 959,8 млн м³. По Приволжскому федеральному округу Пермский край в 2021 г. занял пятое место по объему сброса загрязненных и очищенных стоков. При этом объем сброса загрязненных сточных вод без

очистки составил 33,8 млн м³. Качество воды большинства рек Пермского края на протяжении последних десятилетий не отвечает нормативам рыбохозяйственных водоемов, что подтверждается результатами гидрохимических наблюдений, проводимых Пермским ЦГМС – филиалом ФГБУ «Уральское УГМС» (Доклад..., 2021; Торопов, 2013).

Экологическое состояние вод акватории Камского водохранилища на участке в районе от г. Соликамска до г. Березников вот уже на протяжении более десяти лет соответствует 3-му классу качества воды, разряд «б», что характеризует воду как «очень загрязненную». Так, в районе Соликамско-Березниковской агломерации на протяжении последних 10 лет среднегодовые концентрации марганца в водах Камского водохранилища достигают превышения ПДК_{рх} в 10 раз, железа – в 5, содержание фенолов повысилось до 2 ПДК_{рх} (Доклад..., 2021). Это создает проблему забора воды ненормативного качества из Камского водохранилища на участке от г. Соликамска до г. Березники для промышленного водоснабжения (Лепихин и др., 2021). Присутствие высоких концентраций микроэлементов в воде при ее заборе могут быть причиной поступления загрязняющих веществ при сбросе сточных вод предприятий, оплачиваемых водопользователями (Ушакова и др., 2023).

Гидробиологические исследования. Участок верхней части Камского водохранилища, расположенный выше Соликамско-Березниковской агломерации, характеризуется благоприятными условиями для развития гидробионтов. Ниже по течению в районе размещения крупных промышленных объектов городов Соликамска и Березники помимо многолетнего загрязнения вод зафиксировано изменение видовой и трофической структуры гидробионтов, влияющее на их физиологические процессы (Зиновьев и др., 2018). Исследованиями (Зиновьев и др., 2011) отмечено, что в первую очередь на техногенное воздействие от промышленных стоков реагирует бентос, в меньшей степени зоопланктон, о чем свидетельствуют количественные и качественные показатели групп донных и планктонных животных.

Малые реки имеют большое экологическое значение в формировании гидрохимического и гидрологического стока больших водотоков, при этом они очень чувствительны к различным техногенным воздействиям (Зубарев, 2014; Максимова и др., 2014). Качество вод малых рек в пределах левобережья Камы на территории Соликамско-Березниковской агломерации демонстрирует колоссальную техногенную нагрузку в результате воздействия точечных и диффузных источников загрязнения. Основные водотоки (реки Усолка, Чёрная, Поповка, Толыч, Зырянка), являющиеся приемником загрязняющих веществ, являются источником загрязнения верхней части акватории Камского водохранилища. Широко применяемыми на практике индикаторами экологического состояния малых рек, отражающими степень их

загрязнения, являются различные химические показатели абиотических компонентов (поверхностных вод и донных отложений) и биотических составляющих (гидробионтов).

Экологическое состояние малых рек верхней части Камского водохранилища.

Малые реки в пределах Верхнекамского месторождения достаточно изучены в связи с техногенным воздействием калийной промышленности, выражающейся в засолении близлежащих акваторий. Так, например, в бассейне р. Ленвы от верхнего до нижнего течения сухой остаток, как показатель минерализации вод, изменяется от 12 до 18 г/л, что связано с увеличением содержания в воде Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ (Ushakova et al., 2023). Схожая ситуация наблюдается и в других бассейнах рек, которая связана с поступлением фильтрационных вод с территории калийных предприятий, где наблюдается увеличение стока Cl^- 4 раза по сравнению с территориями вне зон влияния (Хайрулина, 2022). Техногенные фильтрационные стоки (диффузное загрязнение) с территории калийных предприятий помимо высокого содержания хлорид-ионов и ионов натрия, содержат высокие концентрации Sr, Mn, Rb, Br, Ba, Cr, Zn, Li, V, что приводит к формированию геохимической специфики в близлежащих водных объектах (Хайрулина, 2014).

Ранее проведенные исследования в бассейне р. Толыч выявили высокие концентрации Fe, Cu, Ni и Hg относительно ПДК_{рх} в декларируемых источниках загрязнения. Высокий уровень содержания указанных элементов в сбросах сточных вод оказывает значительное влияние на участки рек ниже по течению вплоть до устья (перед впадением в Камское водохранилище) (Ushakova et al., 2023).

Состав донных отложений. Территория Соликамско-Березниковской агломерации характеризуется высоким уровнем техногенного осадконакопления, которое сопоставимо с естественным, осадки аккумулируются непосредственно в русле рек или в береговой зоне (Меньшикова, 2016). В условиях длительного сброса сточных вод в р. Чёрную (приток первого порядка р. Камы) донные отложения этого водотока характеризуются высоким содержанием Co, Ni, Li, Mn, Mo, Se, V, Cu, As, Sn, Ti, Y, Cr. Элементный состав донных отложений на участке влияния сброса сточных вод значительно отличается от геохимического фона и кларка осадочных пород (Меньшикова, 2016).

Высокая степень засоления поверхностных вод сохраняется и в донных отложениях, где также наблюдается преобладание Cl^- , Na^+ и K^+ в водной вытяжке. Анализ донных отложений р. Ленвы в районе разгрузки серии соленых родников выявил аккумуляцию V, Ni, Co, As (Хайрулина, 2022). В минеральном составе донных отложений фракции 0,25-0,1 мм исследуемых малых рек преобладает кварц (более 70%), в меньшей степени присутствует халцедон, кремень, полевые шпаты, опал, яшма, эпидот, гранаты, турмалин, ставролит, хлорит,

слюда, пироксены, относящиеся к первичным минералам. Вторичные минеральные образования представлены гидрогетитом, гематитом и другими железистыми минералами. Это свидетельствует об осаждении железа в окислительных условиях на поверхности донных отложений. Кроме того, встречаются углистые образования и органические остатки (Хайрулина и др., 2017).

Вынос загрязняющих веществ и длительная аккумуляция тонкодисперсных аллювиальных отложений в устье рек первого порядка р. Камы в результате различных природных и техногенных факторов представляет риск для нормального функционирования водной экосистемы и здоровья людей, использующих ресурсы этой экосистемы (Shadrin et al., 2020), поскольку в период высокой воды (затопления этих участков) донные отложения могут быть источником первичного и вторичного загрязнения речных вод в результате обменных процессов в системе «речные воды ↔ донные отложения» (Решетняк и др., 2020).

Таким образом, формирование эколого-геохимической обстановки водных объектов на территории северной части Прикамья связано как с природными, так и техногенными факторами. Наибольшая составляющая техногенного стока (сбросы сточных вод) по данным КамБВУ отмечается для рек Чёрной и Толыч, что в целом негативно влияет на экологическую обстановку в верхней части Камского водохранилища на участке от г. Соликамска и г. Березники, предопределяя неблагоприятную экологическую ситуацию нижележащей акватории.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Методы полевых исследований

Полевые исследования (рисунок 2.1.1 и 2.1.2) проводились с 2014 по 2022 г.г. в летний межень на территории водосборных бассейнов рек Усолка, Чёрная, Толыч и Зырянка на территории Соликамско-Березниковской агломерации Пермского края. Полевые работы включали обследование территории водосборных бассейнов с описанием источников и признаков загрязнения, отбор проб поверхностных вод и донных отложений, топографическую привязку точек опробования и наблюдений с помощью навигационного приемника GPS.

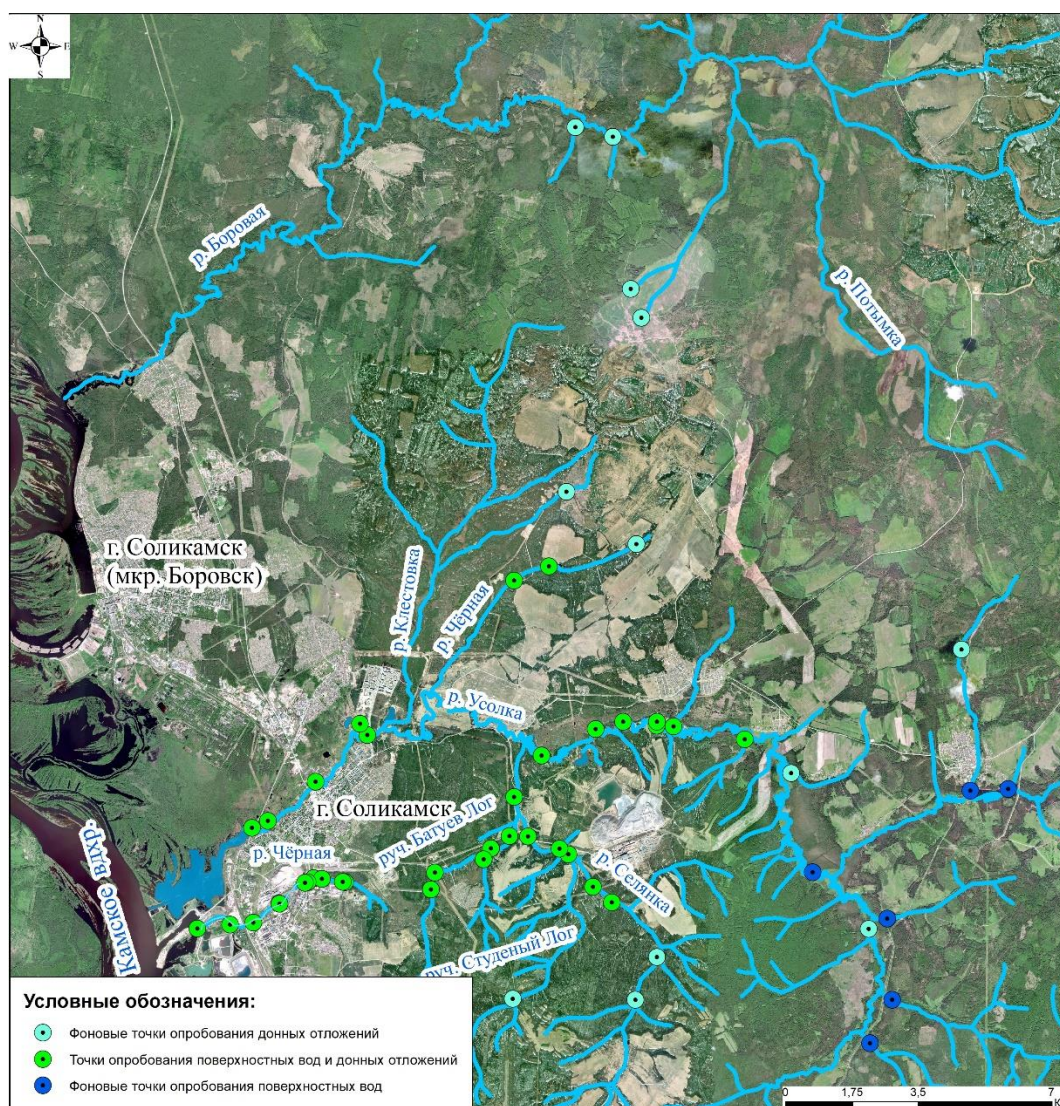


Рисунок 2.1.1 – Карта-схема пунктов опробования поверхностных вод и донных отложений в Соликамском городском округе

Репрезентативность исследований обеспечена соблюдением общих требований к отбору, транспортированию, подготовке к хранению проб воды, предназначенных для определения показателей ее состава (ГОСТ Р 59024-2020, Р 52.24.353-2012, ГОСТ 17.1.5.01-80). Размещение пунктов опробования проводилось с учетом особенностей формирования эколого-геохимического состояния водных объектов. Пункты опробования донных отложений совмещались с пунктами отбора проб поверхностных вод. Пробы поверхностных вод отбирались из приповерхностного слоя до глубины 0,5 м. Пробы донных отложений алеврито-глинистой фракции отбирались на участках прирусловой отмели в местах наибольшей аккумуляции из верхнего слоя осадков (до глубины 0,1 м), как наиболее представительные с точки зрения возможного влияния на качество воды и водную биоту. Пробы помещались в полиэтиленовую или стеклянную герметично закрывающуюся тару, транспортировались в лабораторию, где до анализа находились в прохладном тёмном месте.

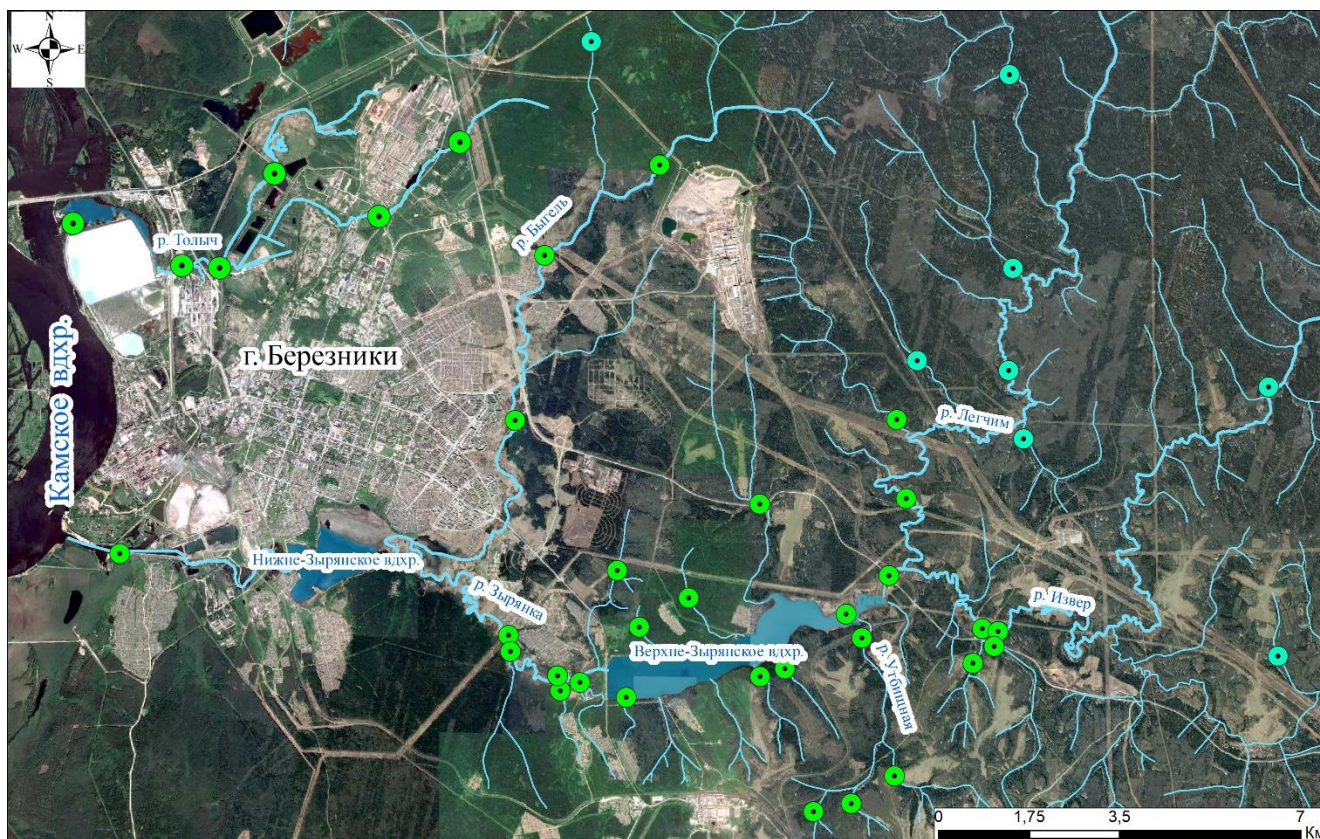


Рисунок 2.1.2 – Карта-схема пунктов опробования поверхностных вод и донных отложений в муниципальном образовании «Город Березники»

Всего на территории Соликамско-Березниковской агломерации отобрано 197 проб поверхностных вод и донных отложений. Из них проб в бассейне р. Усолки – 50, р. Чёрной – 20, р. Толыч – 14, р. Зырянки – 56. Общее количество фоновых проб воды и донных отложений – 57.

Для расчета биотических индексов были использованы данные количественных и качественных характеристик бентофауны и ихтиофауны р. Толыч в меженный период 2021 г., выполненные сотрудниками биологического факультета ПГНИУ (Н.Н. Паньковым и П.Б. Михеевым) в рамках гранта РФФИ (№ 22-24-20069) «Влияние техногенного загрязнения на водные экосистемы Прикамья». Автором в данной работе обобщены и проанализированы результаты гидробиологических исследований и биотических индексов.

2.2 Лабораторные химико-аналитические методы исследования

Лабораторные химико-аналитические исследования проб поверхностных вод и донных отложений выполнены в соответствии с унифицированными методиками и государственными стандартами в лабораториях, имеющих аттестаты аккредитации на соответствующие виды исследований: Лаборатория гидрохимического анализа геологического факультета ПГНИУ (Аттестат аккредитации № RA.RU.21HB29 от 15.05.2018), Сектор наноминералогии лаборатории прогнозного моделирования и управления ПГНИУ (Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518896 от 03.04.2017). Для целей контроля измерений привлекались другие аккредитованные лаборатории г. Перми (Испытательный лабораторный центр ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае», химико-аналитической лаборатории КГБУ «Аналитический центр», испытательная лаборатория ООО «Центр аналитических исследований и экологического мониторинга») (таблица 2.2.1).

Перед лабораторными исследованиями пробы донных отложений были высушены до воздушно-сухого состояния, измельчены растиранием вручную в агатовой ступке. Навески после предварительного усреднения проб квартованием переданы в лабораторию для определения содержания химических элементов в отложениях. Валовое содержание Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, As, Hg в пробах донных отложений и воды определяли методом масс-спектрометрии на приборе AURORA M90 фирмы BRUKER (США). Перед проведением аналитических исследований пробы воды были профильтрованы через фильтр «синяя лента», после они подкислены азотной и плавиковой кислотами до 1 и 0,02% (по объёму). По результатам контрольных (холостых) проб была определена точность анализа для выявления возможного уровня остаточного загрязнения. Пределы обнаружения исследуемых элементов представлены в таблице 2.2.2.

Пробоподготовка донных отложений осуществлялась по методике НСАМ ВИМС 499-АЭС/МС. Предварительно сокращая первичную навеску до 10 г квартованием (методом кольца и конуса), затем проводили ее истирание до крупности частиц 10 мкм в мономельнице Пульверизетте-6 (фирма Fritsch, ФРГ). Навеска 0,1 г истертого образца подвергалась кислотному

(автоклавному) разложению. Все растворы были приготовлены с использованием деионизированной воды, полученной из системы очистки воды «Водолей», а стандартные растворы – из 1000 мг/л стандартных растворов High-PurityStandards (USA). Использованы особо чистые кислоты Merck для растворения проб. Стабильные высокообогащенные изотопы редкоземельных элементов ^{146}Nd , ^{161}Dy , ^{174}Yb использовались для контроля полноты разложения образца. Контроль качества выполнен по результатам анализа аттестованных стандартных образцов, (контрольных) холостых проб и раствора внутреннего стандарта по процедуре, использованной и для анализируемых образцов. Для оценки воспроизводимости измерений все образцы были измерены не менее двух раз.

Таблица 2.2.1 – Химико-аналитические методы исследования проб поверхностных вод и донных отложений

Объект анализа	Лаборатория	Параметры	Метод анализа	Количество проб	Количество определений
Речные воды	Сектор наноминералогии ПГНИУ	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb	Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS)	107	2143
	Лаборатория гидрохимического анализа ПГНИУ	HCO ₃ ⁻ , БПК ₅	Титриметрический		
		Сухой остаток	Гравиметрический		
		Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺	Капиллярного электрофореза		
		pH	Потенциометрический		
		ХПК	Фотометрический		
		Растворенный кислород	Амперометрический		
	Донные отложения	Сектор наноминералогии ПГНИУ	Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg		
Лаборатория гидрохимического анализа ПГНИУ		HCO ₃ ⁻	Титриметрический		
		Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺	Капиллярный электрофорез		
		pH	Потенциометрический		
Общее количество определений:					2923

Определение содержания HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ проводилось методом капиллярного электрофореза с использованием системы «Капель». Водородный показатель донных отложений измеряли с помощью прибора pH-150МИ со стеклянным комбинированным электродом. Определение растворенного кислорода проводилось амперометрическим методом с использованием анализатора жидкости «Эксперт-001». Определение ХПК осуществлялось фотометрическим методом с использованием спектрофотометра «ПЭ-5300ВИ». Определение БПК₅ проводилось титриметрическим методом.

Таблица 2.2.2 – Нижние пределы обнаружения (ПО) содержания микроэлементов в воде и донных отложениях

Показатель	ПО	Показатель	ПО
Вода, мкг/дм ³		Донные отложения, мг/кг	
Cr	1,0	Ni	0,1
Ni	1,0	Cu	0,1
Cu	1,0	Zn	1,0
Zn	1,0	As	0,1
As	1,0	Cd	0,05
Cd	0,5	Hg	0,03
Pb	0,2	Pb	0,1

2.3 Методы камеральной обработки результатов исследования

Существующие методы оценки уровня загрязнения металлами и металлоидами водных объектов разделяются на три группы. К первой группе относятся геохимические методы оценки, основанные на использовании сравнения данных со средними значениями их содержаний в верхней континентальной коре и региональными фоновыми концентрациями. Ко второй относятся методы, основанные на использовании нормативов содержания (ПДК). Например, для оценки качества вод используют СанПиН 1.2.3685-21 или нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения. К третьей группе относятся методы, связанные с использованием комплексных индексов загрязненности, устанавливающие уровень загрязнения на основании классификации того или иного индекса.

Для сравнительной оценки обогащения осадков и речных вод потенциально токсичными элементами использован общепринятый механизм определения геохимической специфики относительно эталона. Концентрации химических элементов в речных водах сравнивались со среднемировыми концентрациями в речных водах по данным В.В Гордеева и А.П. Лисицына (2014). Геохимическая специфика донных отложений оценена на основании использования следующих средних значений содержаний элементов в верхней континентальной коре по данным разных авторов: Ni, Zn, As, Pb, Hg – Н.А. Григорьева (2009); Cu – Z. Hu, S. Gao

(2008); Cd – R.L. Rudnick, S. Gao (2003), рекомендованные Н.С. Касимовым и Д.В. Власовым (2016).

Для оценки фоновых концентраций использованы два основных метода, предложенных J. Matschullat и др. (2000): прямой (геохимический); косвенный (статистический). На основании первого метода необходимо учитывать отдаленность фонового участка от промышленных объектов, т.е. фоновый участок должен быть расположен в пределах ненарушенных техногенным воздействием территорий. Фоновые точки опробования поверхностных вод и донных отложений расположены в верховьях рек Усолки и Зырянки на северо-востоке Пермского края, северо-восточнее г. Соликамска и г. Березники (рисунок 2.1.1 и 2.1.2). Фоновые пробы поверхностных вод и донных отложений отбирались ежегодно с 2017 по 2022 г.г. (таблица 2.3.1). Данная территория исследований расположена на удалении от локального влияния крупных промышленных предприятий и автомагистралей. Ландшафтные особенности территории обусловлены ее размещением в природной зоне восточно-европейских таежных ландшафтов. Территория исследований покрыта смешанными и хвойными лесными массивами, кустарниковой растительностью.

Таблица 2.3.1 – Содержание микроэлементов в поверхностных водах и донных отложениях условной фоновой территории

Поверхностные воды (n=36)			Донные отложения (n=21)		
Cr	мкг/дм ³	7,27	Ni	мг/кг	11,33
Ni		3,51	Cu		10,65
Cu		2,35	Zn		20,85
Zn		3,03	As		5,23
As		0,5	Pb		5,17
Cd		0,25	Cd		0,37
Pb		0,1	Hg		0,02

Статистические методы направлены не только на оценку фоновых концентраций, но и на выделение геохимических аномалий относительно геохимического фона. По мнению многих исследователей (Gałuszka, 2007; Dung et al., 2013; Тепаносян и др., 2017; Опекунова и др., 2019) использование подхода, учитывающего в расчетах значение $\pm 2\sigma$, является достоверным методом оценки фона, позволяющим устранить влияние техногенных факторов. Расчет геохимического фона произведен методом $\pm 2\sigma$ в соответствии с рекомендациями J. Matschullat и др. (2000) для исключения экстремальных значений, что реализовано многочисленной практикой таких исследований (Zgłobicki et al., 2011; Hao et al., 2014; Gałuszka et al., 2016). На основании проведенных тестов на нормальность (K-S: Kolmogorov-Smirnov test, S-W: Shapiro-Wilk test, the box-plot by Stat 13 и др.) установлено, что фоновые значения исследованных химических

элементов поверхностных вод и донных отложений соответствуют логнормальному распределению.

Геохимические и экологические данные, в частности по макро- и микроэлементному составу снежного покрова, поверхностных и подземных вод, донных отложений часто характеризуются высокой долей образцов со значениями ниже уровня обнаружения для некоторых определяемых элементов. Таким образом, данный результат находится ниже некоторого предела обнаружения, который перекрывает истинные значения. Замена значения ниже предела обнаружения на нулевую константу (0) в статической выборке приведет к заниженным расчетным значениям относительно реальных и создаст набор искусственно заниженных чисел. При замене на значения предела обнаружения (ПО), средние значения будут выше реальных и данный подход представит максимально возможные значения истинного среднего. При выполнении замены значения с $ПО/2$ и $ПО/\sqrt{2}$ ошибка будет намного ниже, чем в предыдущих методах. Этот подход очень распространен из-за своей простоты. Большое значение имеет и распределение данных. Так некоторые авторы рекомендуют для нормального распределения данных использовать $ПО/2$ и для логнормального распределения $ПО/\sqrt{2}$. Другое предложение – использовать замещение $ПО/2$ для наборов данных с большим количеством обработанных данных и $ПО/\sqrt{2}$ для наборов данных с относительно небольшим количеством данных ниже предела обнаружения (Verbovsek, 2011).

В ходе статистической обработки фоновых значений химических элементов результаты ниже предела обнаружения ($<ПО$) заменялись $ПО/\sqrt{2}$, при условии, что доля таких значений в выборке не превышает 25%. Данный метод выбран с учетом того, что другие методы работают хуже. Например, замещение на $ПО/2$ или $ПО$ приводит к большим отклонениям, а замещение на ноль или вообще без данных – к наибольшим отклонениям (Reimann et al., 2008; Verbovsek, 2011). Если менее 50% данных находились ниже предела обнаружения, то использовалась медиана выборки в качестве среднего согласно рекомендациям D. R. Helsel и др. (2002).

Экологическая оценка содержания химических элементов в воде бассейнов рек Усолки, Черная, Толыч и Зырянки проводилась на основе сопоставления измеренных показателей состава поверхностных вод с нормативами качества природных вод, установленными Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 №552 для воды водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}). Это связано с необходимостью оценки безопасности водных биологических ресурсов исследуемых рек в связи с активным развитием на них любительского рыболовства, возможной биоаккумуляцией химических элементов в тканях водных организмов.

Эколого-геохимическая оценка **речных вод** на территории исследования выполнена с применением следующих зарубежных и российских интегральных индексов:

Индекс оценки тяжелых металлов (Heavy Metal Evaluation Index (HEI)), который рассчитан с использованием ПДК_{рх} (Edet et al., 2002) по формуле (1):

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{H_{\text{ПДКрх}}}, \quad (1)$$

где H_i – концентрация i -го элемента, измеренная в пробе воды и $H_{\text{ПДКрх}}$ – предельно допустимая концентрация для водных объектов рыбохозяйственного значения i -го элемента. Если $HEI < 10$, то воды имеют низкий уровень загрязнения, $10 \leq HEI < 20$ – средний уровень загрязнения, $HEI \geq 20$ – высокий уровень загрязнения (Moldovan et al., 2022).

Оценка потенциальной опасности (Ecological Risk Index (ERI)), которая количественно определяет риск токсического воздействия на биологические виды от химических элементов в воде (Maskooni et al., 2020; Elmorabet et al., 2022), рассчитана по формуле (2):

$$ERI = \sum_{i=1}^n \left[T_i \times \left(\frac{C_i}{M_i} \right) \right], \quad (2)$$

где C_i – концентрация i -го элемента, измеренного в образце, M_i – фоновое содержание i -го элемента в поверхностных водах, T_i – коэффициент токсичности, который отражает уровень его токсичности и чувствительность водной биоты к нему (Zhu et al., 2022). Коэффициент токсичности химических элементов определяется исходя из следующих значений: Cd=30, Ni=As=10, Cu=Pb=5, Cr=2, Zn=1 (Hakanson, 1980). Показатель ERI классифицирует качество воды по категориям экологического риска: низкий ($ERI < 110$), средний ($110 \leq ERI < 200$), высокий ($200 \leq ERI < 400$) и очень высокий ($ERI \geq 400$) риск.

Индекс загрязнения воды (ИЗВ), рекомендованный при проведении инженерно-экологических изысканиях (СП 502.1325800.2021) и используемый Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей для определения доли превышения ПДК по определённому числу показателей, рассчитан по следующей формуле (3):

$$\text{ИЗВ} = \frac{1}{6} \sum \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}, \quad (3)$$

где C_i – концентрация i -го компонента, ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -го компонента рыбохозяйственного значения. Для расчета ИЗВ были использованы 6 параметров: растворенный кислород, БПК₅, являющиеся обязательными, а также элементы (Ni, Zn, Cu и Cr), которые характеризуются наибольшей токсичностью. Для классификации качества вод по ИЗВ была использована следующая градация: I класс – очень чистые ($\text{ИЗВ} < 0,2$), II класс – чистые ($0,2 \leq \text{ИЗВ} < 1,0$), III класс – умеренно загрязненные ($1,0 \leq \text{ИЗВ} < 2,0$), IV класс – загрязненные ($2,0 \leq \text{ИЗВ} < 4,0$), V класс – грязные ($4,0 \leq \text{ИЗВ} < 6,0$), VI – очень грязные ($6,0 \leq \text{ИЗВ} < 10,0$), VII – чрезвычайно грязные ($\text{ИЗВ} \geq 10$).

Эколого-геохимическая оценка **донных отложений** на территории исследования выполнена с использованием следующих интегральных индексов загрязнения:

Индекс геоаккумуляции (I_{geo}), предложенный G. Müller (1969), является количественным показателем, используемым для оценки степени загрязнения металлами и металлоидами донных отложений, путем сравнения текущих уровней их концентраций с условными фоновыми концентрациями. Он рассчитывался по следующей формуле (4):

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right), \quad (4)$$

где C_n – концентрация элемента, измеренная в пробах донных отложений; B_n – средние концентрации рассматриваемого элемента в донных отложениях условной фоновой территории (таблица 2.3.1); 1,5 – поправочный коэффициент, выражающий минимизацию естественной вариативности фоновых значений рассматриваемого элемента, обусловленный возможным литологическим влиянием.

Для оценки уровня загрязнения донных отложений была использована следующая шкала основных градаций: ($I_{geo} < 0$) – низкий, ($0 \leq I_{geo} < 1$) – от низкого до умеренного, ($1 \leq I_{geo} < 2$) – умеренный, ($2 \leq I_{geo} < 3$) – от умеренного до высокого, ($3 \leq I_{geo} < 4$) – высокий, ($4 \leq I_{geo} < 5$) – от высокого до чрезвычайно высокого, ($I_{geo} \geq 5$) – чрезвычайно высокий (Müller, 1969; Закруткин и др., 2021).

Для оценки потенциального экологического риска загрязнения микроэлементами водных экосистем был использован *индекс RI*, предложенный шведским ученым L. Hakanson (1980). Данный метод учитывает не только содержание химических элементов в донных отложениях, но и экологическую опасность (Ушакова, 2020а). Для расчета RI была использована следующая формула:

$$RI = \sum_{i=1}^m Er^i = \sum_{i=1}^m (T_i \times CF_i), \quad (5)$$

где Er^i – потенциальный риск конкретного элемента; T_r^i – коэффициент токсичности элементов, отражающий токсическую реакцию отдельных элементов для водных организмов ($Hg=40$, $Cd = 30$, $As = 10$, $Ni = Cu = Pb = 5$, $Mn = Zn = 1$, $Cr = 2$); CF_i – отношение содержания исследуемого элемента в донных отложениях к фоновому содержанию этого же элемента. Результаты значений RI оцениваются по следующим категориям экологического риска: $RI < 150$ – низкий; $150 \leq RI < 300$ – умеренный; $300 \leq RI < 600$ – высокий; $RI \geq 600$ – чрезмерно высокий.

Одним из наиболее известных показателей оценки загрязнения донных отложений в России является *суммарный показатель химического загрязнения (Z_c)* (Саэт и др., 1990), который также известен как показатель техногенного загрязнения (Янин, 2002). Суммарный показатель загрязнения Z_c характеризует степень химического загрязнения донных отложений исследуемых территорий вредными веществами различных классов опасности и определяется как сумма коэффициентов концентрации отдельных компонентов загрязнения по формуле (6):

$$Z_c = K_{c1} + \dots + K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n - 1), \quad (6)$$

где n – число определяемых компонентов, K_{ci} – коэффициент концентрации i -го загрязняющего компонента, равный кратности превышения содержания данного элемента над фоновым значением. При расчете суммарного индекса загрязнения, исключаются значения при $K_{ci} < 1$, так как они не влияют на экологическое состояние донных отложений. Если $Z_c < 10$, то донные отложения имеют слабый уровень загрязнения, $10 \leq Z_c < 30$ – средний уровень загрязнения, $30 \leq Z_c < 100$ – высокий уровень загрязнения, $100 \leq Z_c < 300$ – очень высокий уровень загрязнения, $Z_c \geq 300$ – чрезвычайно высокий уровень загрязнения (Янин, 2002).

В настоящее время в российском законодательстве недостаточно разработана система нормирования донных отложений градостроительными, природоохранными и санитарными нормами. В России отсутствует система нормирования донных отложений на основании ПДК. При этом СП 502.1325800.2021 рекомендуется оценка загрязнения донных отложений на основании сравнения с ПДК для почв. В связи с этим сравнение содержаний химических элементов в донных отложениях малых рек Соликамско-Березниковской агломерации выполнено и с нормативами предельно допустимых концентраций химических элементов в почвах согласно СанПиН 1.2.3685-21. Действительно по некоторым составляющим донные отложения химически близки по вещественному составу к почвам, но при этом генезис их совершенно различен (Косинова и др., 2015; Ушакова и др., 2020).

Оценка токсичности донных отложений для живых организмов выполнена с использованием пороговых концентраций воздействия (Threshold effect concentration (TEC)) и концентраций вероятного воздействия (Probable effect concentration (PEC)) согласно руководству по оценке качества донных отложений (Macdonald et al., 2000). Образцы донных отложений считаются нетоксичными, если наблюдаемая концентрация элементов ниже значения TEC . В случае превышения значения PEC , донные отложения считаются токсичными (Мягкая и др., 2022).

Коэффициент $PECQ$ впервые был предложен С. G. Ingersoll и др. (2001) как количественная мера степени загрязнения химическими элементами донных отложений на основании возможного негативного воздействия на водную биоту (Ingersoll et al., 2001). Средние значения $PECQ$ ($mPECQ$) были рассчитаны для каждого образца по следующей формуле (7,8):

$$PECQ = TM_{\text{образец}} / TM_{PEC} \quad (7)$$

$$mPECQ = \sum_{i=1}^n PECQ_i / n, \quad (8)$$

где $TM_{\text{образец}}$ – фактическое содержание i -го элемента в донных отложениях, TM_{PEC} – значение PEC для данного элемента ($Zn=459$, $Cu=149$, $Pb=128$, $Ni=48,6$, $As=33$, $Cd=4,98$, $Hg=1,06$), средний коэффициент PEC ($mPECQ$) был рассчитан для семи измеренных элементов

(Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg) (Ingersoll et al., 2001), n – общее количество элементов. Значения $mPECQ$ классифицируют осадки по следующим четырем категориям: $PECQ < 0,1$ – не оказывает неблагоприятное воздействие на водную биоту; $0,1 \leq PECQ < 0,5$ – слабое неблагоприятное воздействие; $0,5 \leq PECQ < 1,0$ – умеренное воздействие; $PECQ \geq 1,0$ – сильное воздействие (Boguta et al., 2022).

Для количественного выражения миграционной способности элементов был использован коэффициент водной миграции K_x , предложенный А.И. Перельманом (1961), который рассчитывался по следующей формуле (9):

$$K_x = \frac{100 \times m_x}{a \times n_x} \quad (9)$$

где m_x – содержание элемента в воде (г/л), n_x – содержание элемента в породе (литосфере – средние значения содержаний элементов в верхней континентальной коре) (%), a – минерализация вод (г/л). Результаты значений коэффициента K_x разделяются на следующие группы интенсивности водной миграции (Перельман, Касимов, 1999): I – очень сильная ($n \cdot 10 - n \cdot 100$), II – сильная ($n - n \cdot 10$), III – средняя ($0, n - n$) и IV – слабая и очень слабая ($\leq 0, n$), где n – целое число.

Для достижения комплексного подхода к оценке состояния изучаемых водных объектов на основании обобщения эколого-геохимических, эколого-токсикологических и биоиндикационных показателей произведен анализ возможностей применения интегральных показателей экологического состояния речных вод, донных отложений и биотических индексов с апробацией этих показателей для акватории модельного объекта, в качестве которого выбран бассейн р. Толыч, включающий собственно р. Толыч и ее правый приток р. Затолыч.

Оценка качества вод бассейна р. Толыч выполнена с использованием индекса качества вод (Water Quality Index – WQI), индекса загрязнения вод (ИЗВ) с использованием содержания основных ионов, показатель УКИЗВ, индекса органического загрязнения (Organic pollution index – OPI), индекса эвтрофикации (Eutrophication Index – EI); индексов загрязнения металлами HEI, ERI и ИЗВ, где использовали данные по содержанию Ni, Cu, Zn и Cr помимо обязательных показателей, применяемых для расчетов индекса; биотические индексы по структурным характеристикам зообентоса – индекс Шеннона, индекс Вудивисса, индекс Гуднайта - Уитли, индекс Кинга и Болла; мультиметрический индекс Карра, который в литературе также встречается как индекс биотической целостности (index of biotic integrity – IBI), основанный на использовании рыбных сообществ. Для расчета биотических индексов были использованы данные структурной организации бентофауны и ихтиофауны исследованного водотока, выполненные совместно с сотрудниками биологического факультета ПГНИУ в рамках

выполнения гранта РНФ (№ 22-24-20069) «Влияние техногенного загрязнения на водные экосистемы Прикамья».

Абиотические индексы качества вод. Для определения качества вод по физико-химическим показателям во многих зарубежных странах успешно используются различные модификации показателя качества воды (Water Quality Index, WQI), который учитывает разные геоморфологические и климатические характеристики водосборных территорий. В большинстве случаев для расчетов и оценки качества воды использовали от восьми до одиннадцати загрязняющих веществ и показателей – температура, мутность, pH, взвешенные вещества, сухой остаток, колиформные бактерии, растворенный кислород, БПК, ХПК, нитратный азот, фосфат-ион, в меньшей степени – химические элементы в зависимости от специфики загрязнения водного объекта (Uddin et al., 2021). В акватории модельного объекта для расчета WQI использованы девять параметров: pH, растворенный кислород, БПК₅, ХПК, аммоний, фосфаты, взвешенные вещества, Ni, Cu, Zn и Cr (10).

$$WQI = \frac{WQI_{pH}}{100} \left[\frac{1}{5} \sum_{a=1}^5 WQI_a \times \frac{1}{2} \sum_{b=1}^2 WQI_b \times WQI_c \right]^{1/3} \quad (10)$$

где WQI_a – химические параметры (растворенный кислород, БПК, ХПК, аммоний и фосфаты); WQI_b – взвешенные вещества, WQI_c – содержания Ni, Cu, Zn и Cr; WQI_{pH} – значения pH.

По данным Son и др. (2020), на основании рассчитанного балла WQI качество воды классифицируется по пяти категориям: уровень 1 (оценка WQI от 0 до 25 баллов) – вода чрезвычайно сильно загрязнена, требуется экстренная очистка перед повторные использования; уровень 2 (WQI от 26 до 50 баллов) – качество воды пригодно для транспортировки и аналогичных целей; уровень 3 (WQI от 51 до 75 баллов) – качество воды пригодно для ирригации и аналогичных целей; уровень 4 (WQI от 76 до 90 баллов) – качество воды пригодно для бытового использования; уровень 5 (WQI от 91 до 100 баллов) – качество воды пригодно для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Индекс органического загрязнения (Organic pollution index – OPI) позволяет оценить уровень загрязнения водотока по четырем параметрам: (сумма соединений азота – NO₂⁻, NO₃⁻ и NH₄⁺), растворенный неорганический азот, ХПК, растворенные неорганические фосфаты и растворенный кислород, нормированные по отношению к соответствующему ПДК (Liu et al., 2011). Индекс органического загрязнения (OPI) представлен в следующем уравнении (11):

$$OPI = \frac{ХПК}{ХПК_{ПДК}} + \frac{NO_2 + NO_3 + NH_4}{NO_2 + NO_3 + NH_4_{ПДК}} + \frac{PO_4}{PO_{4ПДК}} + \frac{РК}{РК_{ПДК}} \quad (11)$$

По индексу органического загрязнения (ОРИ) воды подразделяются на четыре категории (название приведены в переводной интерпретации): $OPI < 0$ – отличные, $0 \leq OPI < 1$ – хорошие, $1 \leq OPI < 4$ – загрязненные, $4 \leq OPI < 5$ – сильно загрязненные.

Индекс эвтрофикации (Eutrophication index – EI) позволяет оценить степень эвтрофикации водоема с использованием трех показателей: ХПК, растворенный неорганический азот (сумма содержания соединений азота NO_2^- , NO_3^- и NH_4^+), растворенные неорганические фосфаты (Son et al., 2020). Формула для расчета EI приведена ниже (12):

$$EI = \frac{ХПК \times NO_2 + NO_3 + NH_4 \times PO_4}{4500} \times 10^6 \quad (12)$$

По индексу эвтрофикации (EI) водоемы подразделяются на две категории: $EI < 0$ – нулевая эвтрофикация; $EI > 0$ – наличие эвтрофикации.

Расчет удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ) и классификация качества вод по результатам данного индекса выполнены согласно РД 52.24.643-2002 для обобщения информации о химическом составе вод в нижнем течении р. Толыч для сопоставления данного индекса с результатами мониторинга качества вод в Камском водохранилище в районе г. Березники по пунктам федеральной сети Росгидромета. Также рассчитан индекс загрязнения вод (ИЗВ) с использованием основных ионов, определяющих специфику воздействия засоления вод (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+}), для сопоставления с результатами расчетов ИЗВ исследованных объектов по формуле (3).

Биотические индексы качества вод. Во многих странах мира, как и в России законодательные акты требуют применения биологических подходов при мониторинге для оценки экологического статуса поверхностных вод, когда классы качества вод устанавливаются по биотическим индексам. Согласно нормативным документам Росгидромета (Р 52.24.309-2011 и Р 52.24.763-2012) для оценки качества вод рекомендовано проведение биоиндикационных исследований макрозообентоса с использованием индексов Вудивиса и Гуднайта-Уитли. В данной работе для оценки экологического состояния р. Толыч использованы следующие биотические индексы: индекс видового разнообразия Шеннона, биотический индекс Вудивисса, олигохетный индекс Гуднайта - Уитли, индекс Кинга и Болла, отражающий загрязнение вод бытовыми и промышленными стоками. Классификация уровня загрязнения вод приведена в таблице 2.3.2

Индекс биотической целостности (Index of Biotic Integrity – IBI) или мультиметрический индекс Карра был использован для оценки экологического состояния р. Толыч с использованием рыб в качестве биоиндикаторов (Karr, 1986). Изначально индекс IBI был разработан для Северо-Американского континента, он был переработан для Прикамского водотока в рамках исследований рассмотренных в работе (Ushakova et al., 2023). Данный индекс основывался на 12

метриках, включающих видовой состав, численность, трофическое положение или всеядность различных групп рыб, учитывая также процент рыб с болезнями, повреждениями и другими аномалиями (Алексеевнина и др., 2016). В данном исследовании для оценки качества вод р. Толыч были использованы 12 метрик, которые были охарактеризованы тремя категориями: 1 – плохо, 3 – умеренно и 5 – хорошо.

Расчет каждой метрики основан на количестве баллов, равных соотношению значения метрики в фоновой точке опробования на значение метрики в исследуемой точке р. Толыч с последующей оценкой условий (по трем степеням состояния). На основании суммы баллов всех 12 метрик качество вод р. Толыч было классифицировано по следующей шкале: от 12 до 22 – «очень низкое», от 28 до 34 – «низкое», от 40 до 44 – «умеренное», от 48 до 52 – «высокое», от 58 до 60 – «очень высокое» (Семенченко и др., 2010, Karr, 1986).

Таблица 2.3.2 – Уровень загрязнения вод по биотическим индексам

Категория загрязнения вод	Индексы			
	Шеннона	Гуднайта-Уитли	Вудивисса	Кинга и Болла
Чистые	>3	0-59	6-10	>1
Умеренно загрязненные	1-3	60-79	3-5	-
Грязные	<1	80-100	0-2	<1

Для оценки пространственного распределения рассчитанных абиотических и биотических индексов экологического состояния исследуемых малых рек использовалось программное обеспечение ArcGIS. Для обработки полученных эколого-геохимических данных использовались методы статистического анализа в ПО «Statistica» с использованием учебного пособия (Михальчук и др., 2015). Для комплексной оценки экологического состояния исследуемых малых рек использовался коэффициент парной корреляции химических элементов и кластерный анализ, эти подходы применялись и для интерпретации результатов по абиотическим и биотическим индексам. Для группировки индексов качества вод использовался кластерный анализ с использованием метода Ворда. Результаты кластерного анализа представлены в виде древовидной структуры, наглядно отражающей значимость связей анализируемых показателей.

ГЛАВА 3. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛЫХ РЕК СОЛИКАМСКО-БЕРЕЗНИКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

3.1 Экологическая характеристика водосборных бассейнов исследуемых малых рек

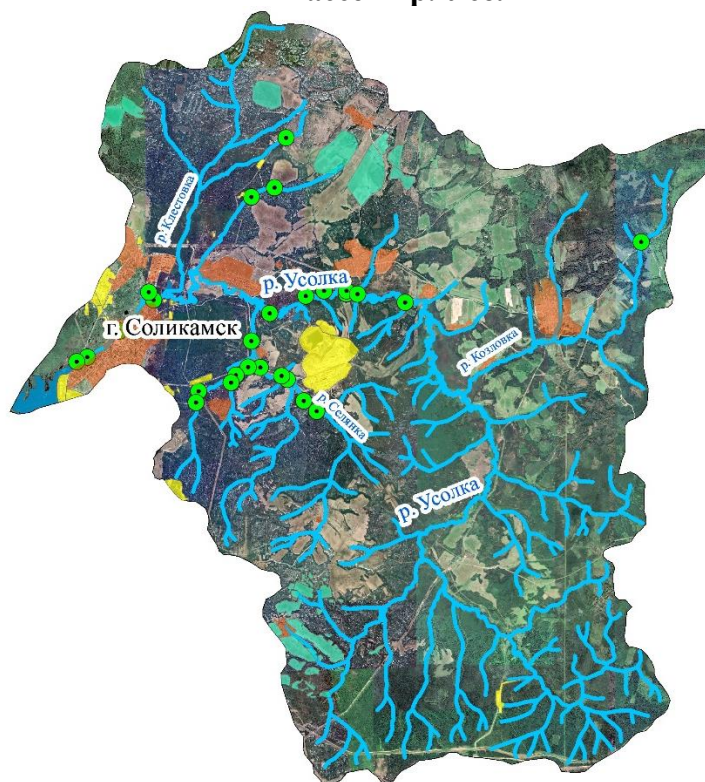
Для понимания формирования качества вод малых рек необходим анализ хозяйственного использования земель в пределах их водосборных бассейнов (Ивичева и др., 2012). Исследования (Кирпичникова и др., 2021; Музыченко, 2022) подтверждают важность использования бассейнового подхода при определении специфики природно-хозяйственных условий для техногенно-нагруженных водосборных бассейнов, где особенно необходимо изучение пространственной структуры землепользования и источников техногенного воздействия.

В результате анализа водосборных площадей малых рек на территории Соликамско-Березниковской агломерации по данным космоснимка Google Earth 2022 года в приложении ArcGis была проведена классификация земель по следующим категориям использования: земли промышленности (промышленные предприятия и необходимая инфраструктура для нужд производства); земли населенных пунктов (индивидуальная и многоэтажная жилая застройка, общественные здания и сооружения, транспортная инфраструктура и места общего пользования); земли лесного фонда (различные виды использования лесов); земли сельскохозяйственного назначения.

По результатам визуально-экспертного дешифрирования были выделены контуры указанных категорий земель в пределах исследуемых водосборных бассейнов (рисунок 3.1.1 и рисунок 3.1.2). Так в бассейне р. Усолки из общей водосборной площади ($F=506 \text{ км}^2$) в структуре земель преобладают земли лесного фонда (82,1% от площади водосбора), далее земли населенных пунктов (9,4% от площади водосбора), земли промышленности и (7,1% от площади водосбора) и земли сельскохозяйственного назначения (7,1% от площади водосбора). При этом основные производства в г. Соликамске сосредоточены в бассейне р. Чёрной, которая характеризуется небольшим водосбором ($F=11,2 \text{ км}^2$), где в структуре земель преобладают земли лесного фонда (до 54,5%), которые распространены в верхней части водосборной площади, далее земли промышленности (до 38,4%) и земли населенных пунктов (до 7,1%).

Анализ пространственного распределения земель водосборного бассейна р. Зырянки с общей площадью 365 км^2 свидетельствует, что 73,9% территории заняты землями лесного фонда, и лишь в нижней части водосбора расположен г. Березники с прилегающими к городу садовыми товариществами, которые занимают 13,1%, соответствуя землям населенных пунктов территории, также фрагментарно в среднем и нижнем течении реки расположены земли

Бассейн р. Усолки



Бассейн р. Чёрной



Рисунок 3.1.1 – Карта распределения земель в бассейнах малых рек в г. Соликамске (желтый цвет – земли промышленности; оранжевый цвет – земли населенных пунктов; зеленый цвет – земли сельскохозяйственного назначения)

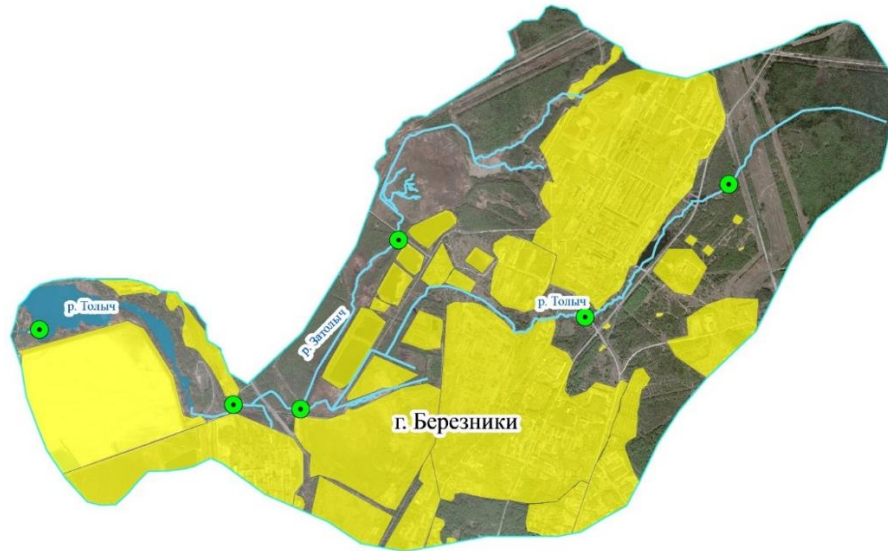
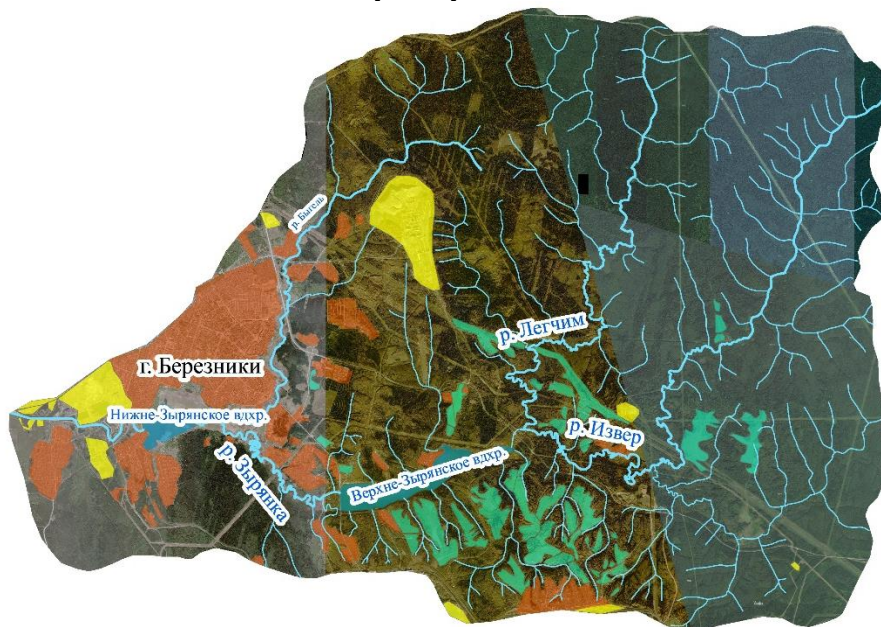
р. Толыч**р. Зырянка**

Рисунок 3.1.2 – Карта распределения земель в бассейнах малых рек г. Березники
(желтый цвет – земли промышленности; оранжевый цвет – земли населенных пунктов;
зеленый цвет – земли сельскохозяйственного назначения)

промышленности (9,9% территории), и только 3,1 % занимают территории сельскохозяйственного назначения. Также, как и в г. Соликамске, основные предприятия г. Березники расположились в пределах водосборной территории одного водного объекта – р. Толыч ($F=36,1 \text{ км}^2$), которые занимают 46,8% площади водосбора реки. Остальная территория в верхней части водосбора занята землями лесного фонда – до 53,2%.

Анализ структуры речных бассейнов на территории исследования свидетельствует о том, что р. Усолка и р. Зырянка имеют схожие гидрологические характеристики, доли площадей, занятых промышленными объектами и городской застройкой, объем поступления в реки загрязнения за счет задекларированных источников. Так доля техногенного стока от естественного в р. Усолка составляет 4,7 %, а в р. Зырянке с учетом использования нормы стока по санитарному пропуску воды в нижнем бьефе водохранилищ – 0,32 %, что свидетельствует о низком техногенном влиянии в пределах этих речных бассейнов. Эти реки имеют высокую транспортирующую способность к выносу загрязняющих веществ в нижнюю часть водосбора (таблица 3.1.1). За счет зарегулированности стока двумя водохранилищами в р. Зырянке происходит снижение миграционной способности литопотоков в нижнюю часть водосбора реки с наибольшей аккумуляцией загрязняющих веществ собственно в чаше водохранилищ, что подтверждено исследованиями, проведенными Н.Г. Максимовичем и С.В. Пьянковым (2012).

Таблица 3.1.1 – Характеристика малых рек территории исследования

Река	Структура водосборной площади, км ²	Длина реки, км	Перепады высот, м	Химический тип вод	Сбросы сточных вод/норма стока, млн м ³ / год
Усолка	F _{водосбора} = 506 F _{промзона} = 36,1 F _{город} = 47,7	57	108-251	HCO ₃ ⁻ - Ca ²⁺ (56%) Cl ⁻ - Na ⁺ (44%)	7,0 (100% недостаточно очищенные)/148
Чёрная	F _{водосбора} = 11,2 F _{промзона} = 4,3 F _{город} = 0,8	6	108-201	HCO ₃ ⁻ - Ca ²⁺ (50%) Cl ⁻ - Ca ²⁺ (30%) Cl ⁻ - Na ⁺ (20%)	13,0 (100% после мех. очистки)/3,0
Толыч	F _{водосбора} = 36,1 F _{промзона} = 16,9	13	108-234	Cl ⁻ - Ca ²⁺ (50%) Cl ⁻ - Na ⁺ (33%) HCO ₃ ⁻ - Ca ²⁺ (17%)	47,0 (до 90% без очистки) /3,1
Зырянка	F _{водосбора} = 365 F _{промзона} = 36,1 F _{город} = 47,7	53	108-241	HCO ₃ ⁻ - Ca ²⁺ (72%) Cl ⁻ - Ca ²⁺ (21%) Cl ⁻ - Na ⁺ (7%)	0,03 (74% после мех. очистки)/9,4*

Примечание: * – норма стока для р. Зырянки приведена в соответствии с «Правилами использования водных ресурсов Верхне-Зырянского и Нижне-Зырянского водохранилищ», 0,3 м³/с – санитарный пропуск воды в нижнем бьефе

Следует отметить, что бассейны рек Толыч и Чёрная характеризуются небольшой площадью водосбора со значительной долей площадей, занятых промышленными объектами и городской застройкой, что составляет 46,8% и 45,5%, соответственно. Эти территории имеют водонепроницаемую поверхность, что снижает поступление естественного поверхностного стока в реки. В сочетании с большим количеством сточных вод разной степени очистки это предопределяет формирование стока этих малых рек преимущественно за счет техногенных факторов, среди которых только разрешенный декларированный сброс сточных вод в бассейне р. Толыч составляет 47 млн м³ в год. Так превышение техногенного стока относительно

естественного в р. Чёрной составляет 4,3 раза, в р. Толыч – 15,2 раза, что свидетельствует о значительном влиянии задекларированных источников на формирование химического состава вод этих объектов.

На территории Соликамско-Березниковской агломерации формирование химического состава вод малых рек обусловлено уровнем техногенного воздействия, связанного с поступлением разного объема декларированных сбросов сточных вод, а также диффузного загрязнения от промышленных объектов химической отрасли и поверхностного стока с городской территории. В результате различных гидрологических условий и степени техногенного воздействия на водосборе малых рек происходит трансформация химического состава вод от $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ (минерализация 0,3 г/л) к $\text{Cl}^- \text{-Na}^+$ и $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ (15 г/л), которая связана как с природными (геологическое строение, разгрузка естественных минерализованных вод из родников с минерализацией вод до 4 г/л), так и техногенными факторами (фильтрация хлоридных рассолов (с минерализацией 30-400 г/л) от объектов размещения отходов калийных предприятий и сбросы сточных вод предприятий, использующих в своем производстве рассолы или руды Верхнекамского месторождения солей, поступление хлоридных рассолов из старых рассолоподъемных скважин с минерализацией более 30 г/л), что отмечалось ранее в предыдущих исследованиях (Бельтюков, 2000; Белкин, 2019).

3.2 Химический состав речных вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Гидрохимическая фация фоновых водотоков характеризуется как гидрокарбонатно-кальциевая с ультрапресными и пресными водами (0,08-0,41 г/л), на этих участках рек отмечаются низкие концентрации микроэлементов как в поверхностных водах, так и донных отложениях. Воды малых рек г. Соликамска и г. Березники отличаются значительной вариацией минерализации (р. Усолка – 0,12-1,9 г/л; р. Чёрная – 0,35-15 г/л, р. Толыч – 0,26-1,9 г/л, р. Зырянка – 0,13-8,7 г/л) с увеличением вниз по течению концентраций элементов в речных водах. Среди исследованных объектов наибольшие концентрации микроэлементов отмечены в р. Чёрной (территория г. Соликамска) и р. Толыч (г. Березники). Воды этих объектов слабощелочные, величина pH в среднем составляет 7,7 (таблица 3.2.1). Лишь в отдельных точках опробования отмечены слабокислые (pH 6,5) и щелочные (pH 8,9) воды.

Среднее значение минерализации вод исследуемых малых рек составляет 1,3 г/л (таблица 3.2.1), что согласно с классификацией А.М. Овчинникова соответствует солоноватым. Наименьшая средняя величина минерализации вод зафиксирована в р. Усолке, что соответствует повышенной минерализации (0,5 г/л), а наибольшая в р. Чёрной – соленые воды (5,0 г/л).

Таблица 3.2.1 – Классификация вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Водоток	Кол-во проб	Формула Курлова/Характеристика воды
Фон	30	$M0,2 \frac{HCO_3 86 SO_4 10}{Ca 77 Mg 17} pH 7,9$ Пресная, гидрокарбонатная кальциевая, слабощелочная
Усолка	25	$M0,5 \frac{HCO_3 50 Cl^- 40 SO_4 10}{Ca 54 Na 25 Mg 17} pH 7,8$ С повышенной минерализацией, хлоридно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая, слабощелочная
Чёрная	10	$M5,0 \frac{Cl^- 61 SO_4 30}{Ca 46 Na 28 Mg 16 K 10} pH 7,4$ Солёная, хлоридная натриево-кальциевая, нейтральная
Толыч	6	$M0,9 \frac{Cl^- 69 HCO_3 21 SO_4}{Ca 49 Na 37} pH 7,7$ С повышенной минерализацией, хлоридная натриево-кальциевая, слабощелочная
Зырянка	28	$M0,8 \frac{HCO_3 55 Cl^- 36}{Ca 58 Mg 21 Na 18} pH 7,7$ С повышенной минерализацией, хлоридно-гидрокарбонатная магниевая-кальциевая, слабощелочная
Общее	69	$M1,3 \frac{HCO_3 47 Cl^- 44}{Ca 54 Na 24 Mg 18} pH 7,7$ Солоноватая, хлоридно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая, слабощелочная

Примечания: минерализация приведена в г/л.

Увеличение доли хлорид-ионов (до 8,8 г/л) в нижнем течении р. Чёрной зафиксировано после сбросов сточных вод химических предприятий. Преобладание хлорид-иона (до 1,2 г/л) в водах р. Толыч наблюдается от верхнего до нижнего течения. Повышение балансовой доли Cl^- в водах связано с точечными (сбросы сточных вод на разных участках реки) и диффузными источниками (родниковая разгрузка высокоминерализованных вод, фильтрационная разгрузка от объектов накопленного вреда, разгрузка рассолов из старых рассолоподъемных скважин) загрязнения.

По соотношению основных ионов исследуемые реки имеют пестрый химический состав вод. Как показано на рисунке 3.2.1 воды малых рек имеют различный анионный и катионный состав, выраженный в положении соответствующих точек, отвечающих составу вод в различных зонах диаграммы Пайпера: гидрокарбонатные, хлоридные и смешанные по анионам; кальциевые, смешанные и натриевые по катионному составу. В бассейне рек Усолка, Чёрная и Зырянка воды характеризуются преобладанием в составе $HCO_3^- - Ca^{2+}$, а в р. Толыч только $Cl^- - Ca^{2+}$ (таблица 3.1.1).

Распределение микроэлементов в поверхностных водах в водных объектах на территории Соликамско-Березниковской агломерации значительно варьируется от верховья к устью (таблица 3.2.2). При этом уровень техногенной нагрузки, приводящей к изменению качества вод, для водосборных бассейнов р. Усолки и р. Чёрной на территории г. Соликамска, существенно различается. Наиболее низкие концентрации элементов, как правило значения ниже предела обнаружения, зафиксированы в местах отсутствия техногенного воздействия (верхние части водосборов исследуемых рек). Наиболее высокие концентрации Cr, Ni, Zn, As, Cu, Pb установлены в водах р. Чёрной, которые связаны со сбросом сточных вод. Максимальная нагрузка точечными и диффузными источниками загрязнения среди исследуемых рек г. Соликамска зафиксирована в устьевой части р. Чёрной, где содержание Cr достигает $921,74 \text{ мкг/дм}^3$, As – $386,25 \text{ мкг/дм}^3$, Ni – $297,48 \text{ мкг/дм}^3$, Cu – $19,91 \text{ мкг/дм}^3$, Zn – $13,73 \text{ мкг/дм}^3$, Cd – $0,34 \text{ мкг/дм}^3$, Pb – $0,04 \text{ мкг/дм}^3$.

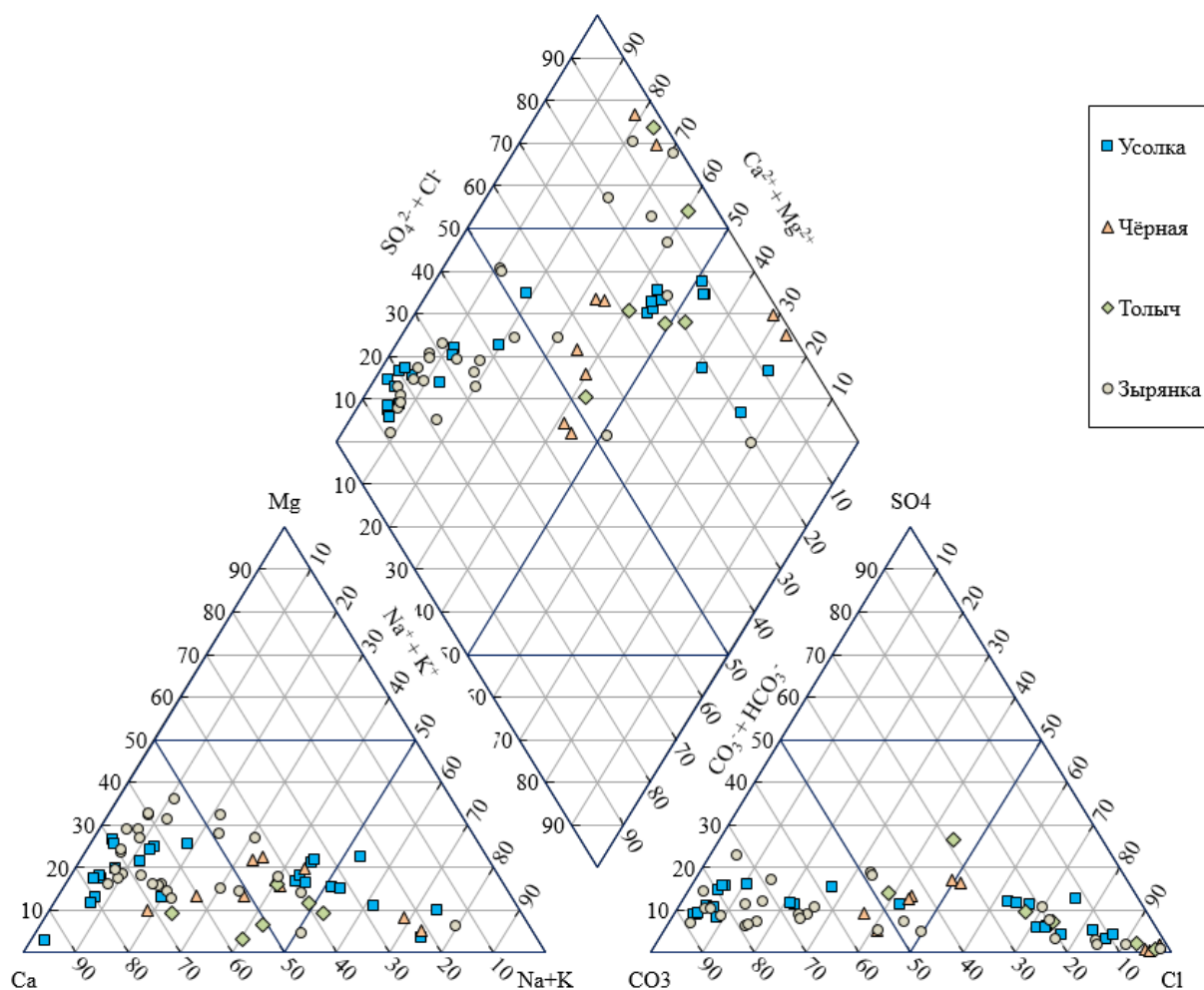


Рисунок 3.2.1 – Диаграмма Пайпера химического состава вод исследуемых малых рек

На территории г. Березники содержание микроэлементов в водах р. Толыч и р. Зырянки значительно варьируются. Наибольшие значения по всем исследуемым элементам зафиксированы в р. Зырянке, однако наибольшие средние значения для таких элементов как Ni (20,88 мкг/дм³) и Cu (5,07 мкг/дм³) установлены в водах р. Толыч. Согласно значениям коэффициента вариации, совокупность данных по содержанию микроэлементов в речных водах рек Усолки, Чёрной и Зырянки является неоднородной, а в р. Толыч для отдельных элементов (Cr и Zn) – однородной.

Таблица 3.2.2 – Содержание микроэлементов в речных водах (мкг/дм³) малых рек Соликамско-Березниковской агломерации (диапазон/среднее)

	г. Соликамск				г. Березники				Условный фон (среднее)
	р. Усолка		р. Чёрная		р. Толыч		р. Зырянка		
	Диапазон среднее	CV,%	Диапазон среднее	CV,%	Диапазон среднее	CV,%	Диапазон среднее	CV,%	
Речные воды									
Cr	$\frac{< 1,0 - 18,0}{5,89}$	86	$\frac{< 1,0 - 921,7}{151,42}$	192	$\frac{2,74 - 4,74}{3,43}$	24	$\frac{< 1,0 - 176,4}{14,82}$	225	7,27
Ni	$\frac{< 1,0 - 39,0}{7,80}$	136	$\frac{< 1,0 - 546,0}{151,57}$	141	$\frac{12,61 - 31,34}{20,88}$	35	$\frac{< 1,0 - 43,7}{5,5}$	157	3,51
Cu	$\frac{< 1,0 - 63,0}{8,92}$	196	$\frac{< 1,0 - 103,0}{27,88}$	148	$\frac{3,02 - 7,76}{5,07}$	35	$\frac{< 1,0 - 9,45}{2,63}$	85	2,35
Zn	$\frac{< 1,0 - 40,0}{5,94}$	153	$\frac{< 1,0 - 167,0}{42,44}$	152	$\frac{3,45 - 7,08}{5,21}$	25	$\frac{< 1,0 - 41,95}{5,79}$	158	3,03
As	$\frac{< 1,0 - 5,0}{1,72}$	80	$\frac{1,0 - 386,25}{86,34}$	150	$\frac{< 1,0 - 4,29}{1,30}$	112	$\frac{2,84 - 13,78}{8,28}$	253	0,5
Cd	$\frac{< 0,5 - 0,37}{0,29}$	34	$\frac{< 0,5 - 1,60}{0,52}$	121	<0,50*	0	<0,50	0	0,25
Pb	$\frac{< 0,2 - 79,0}{4,23}$	462	$\frac{< 0,2 - 3,70}{1,19}$	149	$\frac{< 0,2 - 0,43}{0,25}$	51,66	$\frac{< 0,2 - 39,32}{6,05}$	160	0,1

Примечание: * - во всех пробах речных вод значения Cd в р. Толыч и р. Зырянке находятся ниже предела обнаружения.

Сравнение средних концентраций микроэлементов в водах исследуемых малых рек со среднемировыми концентрациями элементов в речных водах по В.В. Гордееву и А.П. Лисицыну (2014) выявило значительные превышения в р. Чёрной (151-43 раза) по Cr, Ni, As, в меньшей степени (4-1,5 раз) по Cu, Cd и Zn (рисунок 3.2.2). Однако превышения по Cr (в 7,3 раза) и Ni (в 1,7 раз) зафиксированы и в фоновых пробах для этой территории исследования. В бассейне р. Толыч среднее содержание Ni, Cr, Cd превышают среднемировые концентрации 9-1,8 раз, в р. Усолке – Cr, Ni, Cd, Cu в 6-1,3 раз, а в р. Зырянке – Cr, Pb, Ni, Cd в 17-1,8 раз.

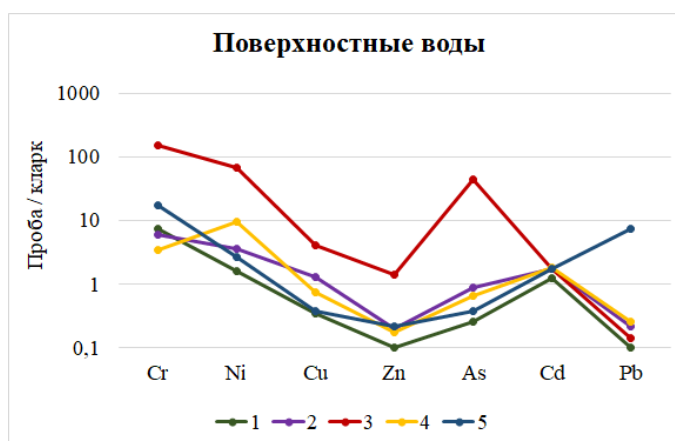


Рисунок 3.2.2 – Средние содержания микроэлементов и условный фон, нормированные по средним глобальным концентрациям

(1 – фон; 2 – р. Усолка; 3 – р. Чёрная; 4 – р. Толыч; 5 – р. Зырянка)

Сравнение содержания микроэлементов в речных водах малых рек Соликамско-Березниковской агломерации с их концентрациями в других реках Пермского края свидетельствует, что средние концентрации элементов в исследованных реках значительно превышают содержание элементов (до 150 раз) в воде р. Косьювы, находящейся длительное время под влиянием самоизлива кислых шахтных вод, который связан с затоплением шахт Кизеловского угольного бассейна (таблица 3.2.3). Из исследованных объектов воды р. Черной характеризуются более высоким содержанием Cr, Ni, Cu относительно р. Егошихи, являющейся малой рекой столицы Прикамья. При этом в р. Егошихе характерно высокое содержание Cr, Ni, Cu – типичных элементов для рек урбанизированных территорий, что отмечалось в работе Н.С. Касимова (2013). Содержание исследованных элементов в реках Усолка, Толыч, Зырянка в целом меньше, чем в р. Егошихе на территории г. Перми, но больше чем в реках Сылта и Вишера, что связано с отсутствием техногенных источников в пределах их водосборов.

Таблица 3.2.3 – Среднее содержание микроэлементов (мкг/дм³) в речных водах Пермского края

Река	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Ссылки
Соликамско-Березниковская агломерация								
р. Усолка	5,9	7,8	8,9	5,9	1,7	0,3	4,2	Результаты данного исследования
р. Чёрная	151,4	151,5	27,9	42,4	86,3	0,5	1,2	
р. Толыч	3,43	20,88	5,07	5,21	1,30	<0,5	0,25	
р. Зырянка	14,82	5,53	2,63	5,79	8,28	<0,5	6,05	
Пермский край								Гилева и др., 2014
р. Сылта	н/о	1	2	н/о	-	-	н/о	
р. Мулянка	2	3	3	н/о	-	-	1	
р. Егошиха	34,28	31,94	5,76	1,49	2,25	<0,5	<0,2	Ушакова и др., 2023
р. Косьва	<1	5,68	1,93	6,66	<1	<0,5	0,50	
р. Вишера	1,04	<1	<1	1,32	<1	<0,5	<0,2	

Примечание: *н/о – значение ниже предела обнаружения; прочерк – данные отсутствуют.

3.3 Эколого-геохимическая оценка речных вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

При сравнении концентраций микроэлементов в речных водах исследованных малых рек с фоновыми значениями выявлен наибольший уровень превышения по Pb (в 790 раз) *р. Усолке*, по As (в 772 раза), Cr (в 126 раз), Zn (в 55 раз), Ni (в 48 раз), Cu (в 43 раз) *в Чёрной*. Наибольшая доля проб, превышающих фоновые значения, в *р. Усолке* установлена по Pb – 100%, далее 48% проб по Zn и As, 44% проб по Cu, 40% проб по Ni, 28% проб по Cr, 8% проб по Cd (таблица 3.3.1). Содержание As в *р. Чёрной* превышает фоновые значения во всех пробах, в 100% проб зафиксированы превышения по Pb, 80% проб – по Cr, в 70% проб – по Ni, в 60% проб – по Zn, в 50% проб – по Cu, в 30 % проб – по Cd. В *р. Толыч* во всех пробах зафиксировано превышение относительно фоновых проб. Превышения фоновых значений зафиксированы в *р. Зырянке* во всех пробах по As, в 93% проб по Pb, в 43% проб по Cu и Zn, в 34% проб по Cr и в 7% проб по Ni.

Таблица 3.3.1 – Доля проб воды рек Соликамско-Березниковской агломерации, имеющих превышения по содержанию микроэлементов относительно ПДК и фоновых значений, %

Элемент	р. Усолка	р. Чёрная	р. Толыч	р. Зырянка
Cr	– / 28	50 / 80	– / 100	14 / 34
Ni	28 / 40	50 / 70	100 / 100	14 / 46
Cu	84 / 44	60 / 50	100 / 100	82 / 43
Zn	12 / 48	40 / 60	– / 100	– / 43
As	– / 48	– / 100	– / 100	4 / 100
Cd	– / 8	– / 30	– / –	– / –
Pb	– / 100	– / 100	– / 100	29 / 93

Примечание: черный цвет – превышения относительно ПДК; голубой цвет – превышения относительно фона

При сравнении с нормативами качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) выявлены превышения в *р. Усолке* по Cu в 84% проб, по Ni – 28%, по Zn – 12%; в *р. Чёрной* – 60% проб имеют превышения по Cu, 50% по Cr и Ni, 40% – по Zn; в *р. Толыч* 100% – по Ni и Zn; в *р. Зырянке* 82% – по Cu, 29% – Pb, 14% – Cr и Ni, 11% – по Ni и 4% – по As (таблица 3.3.1).

С учетом различных геологических, геоморфологических, гидрологических и техногенных факторов, наихудшее экологическое состояние водных объектов выявлено у реки Чёрной, характеризующейся наименьшей водосборной площадью, где большую ее часть занимают промышленные предприятия с объектами накопленного вреда и значительным объемом поступления техногенного стока (до 13 млн м³ в год). Наибольший средний уровень

загрязнения по ИЗВ зафиксирован в р. Чёрной (ИЗВ = 10,8, «чрезвычайно грязные воды»), при этом значения ИЗВ варьировались от 0,5 («чистые воды») до 29,1 («чрезвычайно грязные воды»). Значения ERI от верхнего течения и до нижнего р. Чёрной находились в диапазоне от 36,8 до 8916, что соответствует общему уровню экологического риска от низкого до очень высокого, при среднем 2388 (очень высокий экологический риск). При использовании индекса HEI средний уровень загрязнения вод определен как низкий, при этом на отдельных участках реки выявлен высокий уровень загрязнения (HEI=25) (рисунок 3.3.1, таблица 3.3.2).

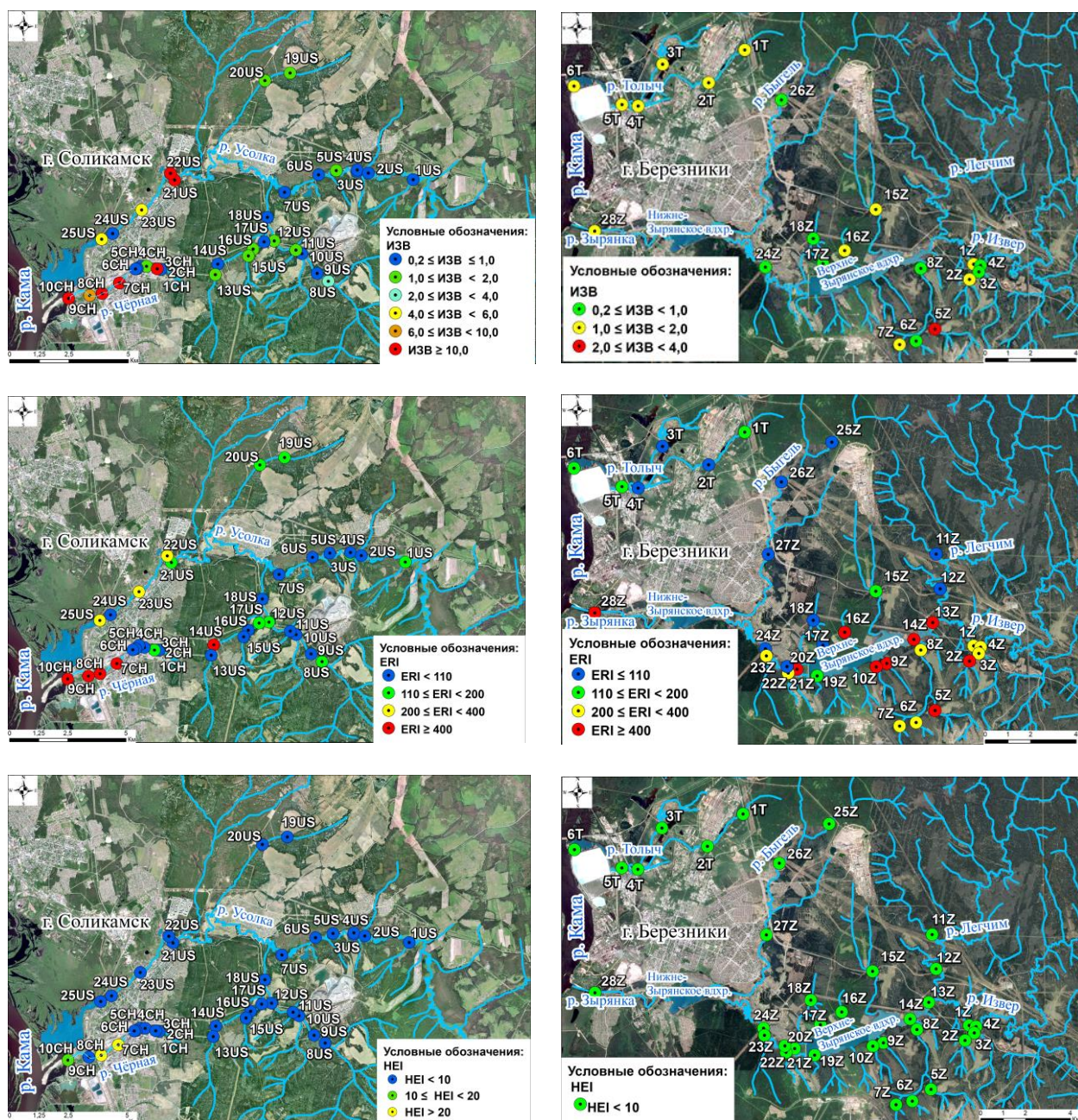


Рисунок 3.3.1 – Распределение показателей экологического состояния поверхностных вод в малых реках на территории Соликамско-Березниковской агломерации

Таблица 3.3.2 – Значения интегральных показателей загрязнения микроэлементами речных вод исследуемых малых рек

	р. Усолка			р. Чёрная			р. Толыч			р. Зырянка		
	ИЗВ	HEI	ERI	ИЗВ	HEI	ERI	ИЗВ	HEI	ERI	ИЗВ	HEI	ERI
Me	1,0	0,6	105,3	4,7	3,4	386,6	1,5	1,1	148,8	0,9	0,7	283,5
Mean	2,1	1,5	282,5	9,8	8,1	2388,9	1,5	1,1	154,1	1,1	0,8	447,2
X _{Min}	0,5	0,2	69,6	0,5	0,1	36,8	1,1	0,8	128,8	0,6	0,2	29,5
X _{Max}	10,8	9,1	4015,8	29,1	25,0	8916,0	1,8	1,4	193,5	2,2	3,2	2046,3

Примечания: Me – медиана, X_{Max} и X_{Min} – максимальное и минимальное значения выборки

Низкий уровень загрязнения вод микроэлементами выявлен в р. Толыч, несмотря на высокий уровень техногенной нагрузки в бассейне реки, где поступления сточных вод декларированных источников разной степени очистки составляют до 47 млн м³ в год. Сравнение результатов интегральных показателей загрязнения свидетельствуют, что средний уровень ИЗВ соответствует умеренно загрязненным водам, HEI и ERI – низкому загрязнению. Обобщенные данные по уровням загрязнения тяжелыми металлами речных вод исследуемых рек по результатам оценки ИЗВ, HEI и ERI представлены на рисунке 3.3.1.

Бассейн реки Усолки

Использование различных подходов к оценке загрязнения вод микроэлементами в бассейне реки Усолки свидетельствует о вариации уровня техногенного загрязнения (рисунок 3.3.2). Так по индексу HEI качество вод соответствует низкому уровню (HEI<10) загрязнения во всех точках опробования. При использовании ИЗВ и ERI качество вод в бассейне р. Усолки характеризуется различным уровнем загрязнения. Большинство исследованных проб относятся к категории низкого экологического риска по ERI, а по индексу загрязнения воды – ко второму и третьему классу качества вод (чистые и умеренно загрязненные воды, соответственно). Высокий уровень загрязнения в бассейне р. Усолки связан с повышенным содержанием Ni и Zn, который наблюдается в нижнем течении реки.

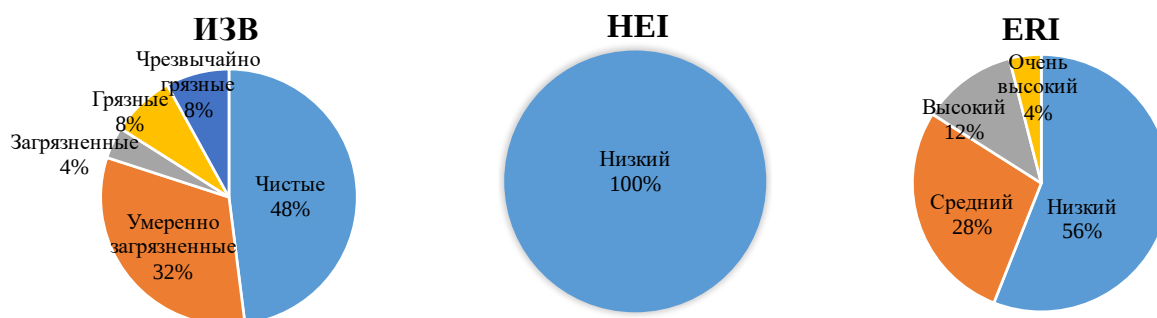


Рисунок 3.3.2 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения речных вод р. Усолки

На рисунке 3.3.3 представлено распределение микроэлементов в водах р. Усолки, где варьирование содержаний связано с техногенными и природными факторами на водосборе реки.

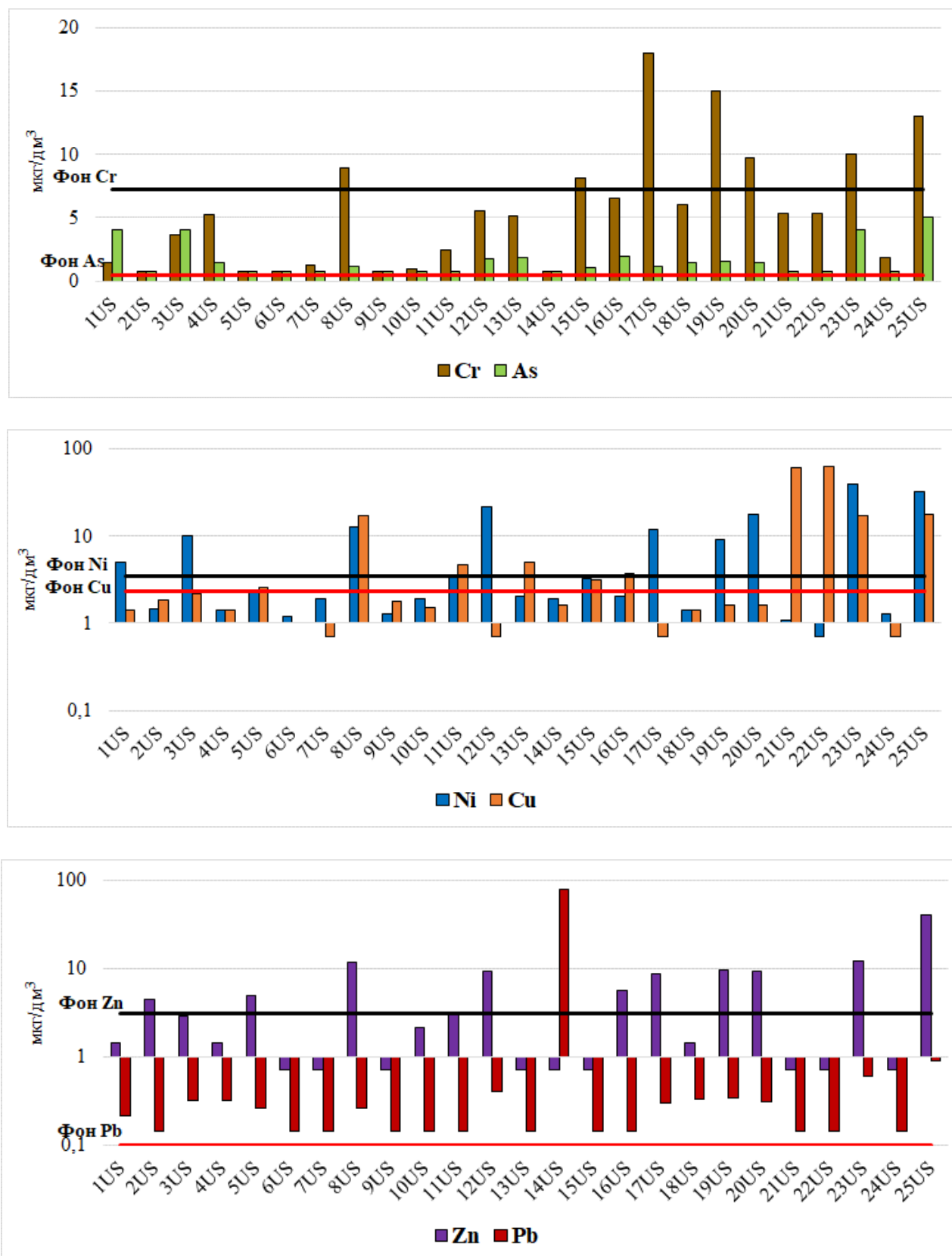


Рисунок 3.3.3 – Распределение микроэлементов в водах р. Усолки

В пределах водосборного бассейна р. Усолки выявлены участки с максимальными содержаниями Ni, Cu, Zn, As в нижнем течении реки, где также зафиксирован рост минерализации (до 1,3 г/л) с хлоридно-натриевой фацией вод, а для Cr и Pb – в пределах водосбора руч. Подгорный Лог, что возможно обусловлено геохимической специализацией пород или поступлением стока с территории садоводческих кооперативов, расположенных в верховье водотока. Увеличение концентраций макро- и микрокомпонентов в нижнем течении р. Усолки отмечено в районе жилой застройки г. Соликамска, что связано с поверхностным стоком с селитебной территории, поступлением высокоминерализованных вод родниковой разгрузки и рассолов из старых рассолоподъёмных скважин. При этом в бассейне р. Усолки наибольшие значения интегральных экологических индексов зафиксированы в нижнем течении реки, где воды характеризуются как чрезвычайно грязные по ИЗВ, по ERI отмечен высокий уровень загрязнения вод.

С целью проверки наличия взаимосвязей между макро- и микрокомпонентами в бассейне р. Усолки был проведен корреляционный анализ (таблица 3.3.3). Анализ выявил статически значимые ($p < 0,05$) положительные корреляции в первую очередь между Cl^- и Na^+ , что характерно для природных вод на территории Верхнекамского месторождения, высокие значения коэффициентов отмечены между Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ и SO_4^{2-} , что связано с процессами выщелачивания и ионным обменом при контакте горных пород с подземными водами, которые в свою очередь разгружаются в долине р. Усолки (Хайрулина, 2022; Белкин, 2018).

Таблица 3.3.3 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между микрокомпонентами и другими показателями речных вод в бассейне р. Усолки ($n=25$)

	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
HCO_3^-	1,00	0,46	0,25	0,65	0,43	0,20	0,04	0,08	0,09	0,25	0,14	-0,23	0,31	-0,47
SO_4^{2-}		1,00	0,65	0,67	0,87	0,72	0,75	0,05	-0,16	0,30	-0,11	-0,08	0,20	-0,15
Cl^-			1,00	0,87	0,83	0,95	0,78	0,03	-0,01	0,21	-0,01	-0,04	0,06	0,03
Ca^{2+}				1,00	0,86	0,76	0,61	0,01	0,06	0,25	0,08	-0,08	0,13	-0,25
Mg^{2+}					1,00	0,78	0,86	-0,01	-0,03	0,13	-0,01	0,00	0,09	-0,11
Na^+						1,00	0,78	0,12	-0,04	0,31	-0,04	-0,08	0,10	0,11
K^+							1,00	-0,03	-0,10	-0,01	-0,10	0,00	0,11	0,30
Cr								1,00	0,56	0,13	0,58	0,35	-0,15	-0,20
Ni									1,00	0,03	0,77	0,71	-0,63	-0,11
Cu										1,00	0,06	-0,04	-0,01	-0,09
Zn											1,00	0,62	-0,45	-0,11
As												1,00	-0,93	-0,14
Cd													1,00	0,09
Pb														1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

Корреляционный анализ данных по составу вод отдельных объектов показал, что в бассейне р. Усолки отсутствуют статистически значимые корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микрокомпонентами (таблица 3.3.3). Это указывает на поступление элементов за счет различных геохимических процессов в пределах водосборной площади в сочетании с гидрологическими условиями реки. При этом для этого объекта отмечены статически значимые ($p < 0,05$) положительные корреляции ($0,78 < r < 0,98$) между Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , что характерно для природных вод на территории Верхнекамского месторождения. При этом зафиксирована положительная корреляция между Zn и Ni ($r = 0,77$), свидетельствующая об едином источнике поступления этих элементов в поверхностные воды. Умеренный уровень корреляции ($r = 0,75 - 0,50$) между Ni и As, Ni и Cr, As и Zn позволяет предположить взаимосвязанный источник поступления этих элементов.

Анализ содержания микроэлементов в водах родников, расположенных на условной фоновой территории и в пределах влияния калийных рудников, зон разгрузки рассолов из старых рассолоподъемных скважин (Людмилинская скважина, территория г. Соликамска) в бассейне р. Усолки, свидетельствует о значительных концентрациях в первую очередь Ni, As и Zn, находящихся на уровне или значительно выше, чем в поверхностных водах р. Усолки (Белкин, 2019; Чайковский и др., 2019). Следует отметить, что наибольшее увеличение концентраций элементов в исследуемом бассейне происходит при пересечении реки селитебной зоны г. Соликамска. На участке р. Усолки на расстоянии 8,5 км до устья начинается современная жилая застройка г. Соликамска, здесь наблюдается наибольшее увеличение концентраций микроэлементов в водах с их увеличением минерализации до 1,3 г/л.

Увеличение минерализации вод преимущественно Cl-Na состава на этом участке р. Усолки связано с самоизливами рассолов в виде ручьев из старых рассолоподъемных скважин, расположенных по обоим берегам, которые были заложены еще в 15 веке и позволяли получать насыщенные хлористым натрием рассолы с глубины 85-100 м. В настоящее время старые рассолоподъемные скважины являются проводником слабоминерализованных вод в поверхностные воды, поскольку тампонаж скважин отсутствовал, а существующая водоизоляция с течением времени нарушалась, при этом устья многих скважин выходят по берегам или в русле рек рассматриваемой территории (Максимович, 1969).

Ранее проведенными исследованиями (2010 г.) ниже железнодорожного моста на правом берегу р. Усолки выявлена серия ручьев с расходом воды 1-15 л/с, связанных как с родниковой разгрузкой, так и с самоизливом из старых рассолоподъемных скважин. Эти воды по величине минерализации солоноватые, с содержанием хлоридов-ионов до 4,4 г/л и ионов натрия до 1,5 г/л, они содержат высокие концентрации таких талассофильных элементов, как Sr до 15,2 мг/дм³, Rb до 18,4 мг/дм³, Cs до 0,01 мг/дм³, Li до 0,4 мг/дм³, что в целом сопоставимо с рассолами Людмилинской

скважины и соотношением содержания макро-и микроэлементов в добываемых калийных рудах (Чайковский и др., 2019). Так же в них выявлено высокое содержание (в мг/дм³) Ti до 0,8, As до 11, V до 15, Zn до 1, Cr до 0,6, Cu до 0,4, Ni до 0,35, Pb до 0,05, Cd до 0,01, которые активно мигрируют с высоконцентрированными растворами на территории Верхнекамского месторождения и связаны с неглубоким залеганием соляной толщи в пределах Соликамских промыслов в долине р. Усолки. Здесь по архивным данным рассольные скважины были доведены до калийных и каменных солей (Максимович, 1969). Таким образом, в нижнем течении р. Усолки значительный вклад в формирование химического состава вод вносит разгрузка высокоминерализованных вод разного генезиса.

Бассейн реки Чёрной

Анализ интегральных показателей загрязнения речных вод р. Чёрной свидетельствует о разном уровне их загрязнения в пределах исследуемого бассейна. На большей части (до 70%) бассейна р. Чёрной зафиксирован низкий уровень загрязнения по индексу HEI (рисунок 3.3.4). При этом высокий уровень техногенного воздействия, начиная со среднего течения и до устья, связанный со сбросами сточных вод, подтверждается всеми индексами загрязнения, среди которых наиболее неблагоприятная обстановка зафиксирована по ИЗВ. На показатель ИЗВ в речных водах значительно повлиял экстремально высокий уровень содержания исследуемых элементов, низкий растворенный кислород и БПК₅. Так по индексу загрязнения воды от верхнего к нижнему течению изменяются от второго до седьмого класса качества вод, т.е. от чистых до чрезвычайно грязных вод, соответственно. Использование индекса ERI, включающего фоновую оценку и поправочный коэффициент токсичности для каждого исследуемого элемента, продемонстрировало три уровня экологической опасности – от низкого в верхнем течении реки и до очень высокого в нижнем течении. Высокий уровень загрязнения в нижней части водосбора реки обусловлен экстремально высоким содержанием Cr, Ni, Zn, Cu и As в воде.

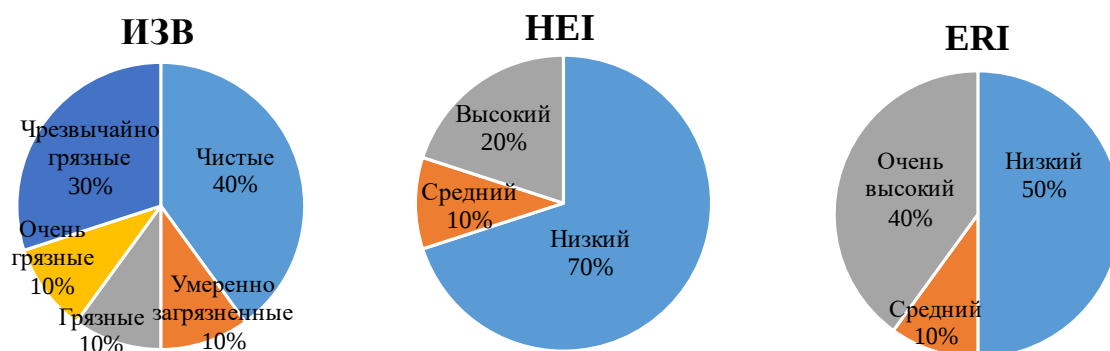


Рисунок 3.3.4 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения вод р. Чёрной

Максимальные содержания микроэлементов в р. Чёрной зафиксированы в нижнем течении реки после сбросов сточных вод. Рост концентраций элементов в воде р. Чёрной связан со сбросами сточных вод предприятий химической промышленности в объеме порядка 13 млн м³/год, которые происходили на участке за 4,3 км от устья (рисунок 3.3.5). Ниже этого участка отмечен рост содержаний As (до 772 раз относительно условного фона), Ni (до 156 раз), Cr (до 127 раз), Zn (до 55 раз), Cu (до 44 раз), Cd (до 6 раз). В этот период минерализация вод в нижнем течении реки достигала 15 г/л. Среди исследованных элементов только Ni и Cr входят в перечень загрязняющих веществ сточных вод с декларированным суммарным объемом сброса ≈136 кг/год. В верхней части водосбора в пруде на р. Чёрной выявлены повышенные значения относительно фона по всем элементам, что связано с поступлением поверхностного стока с прилегающей территории промзоны.

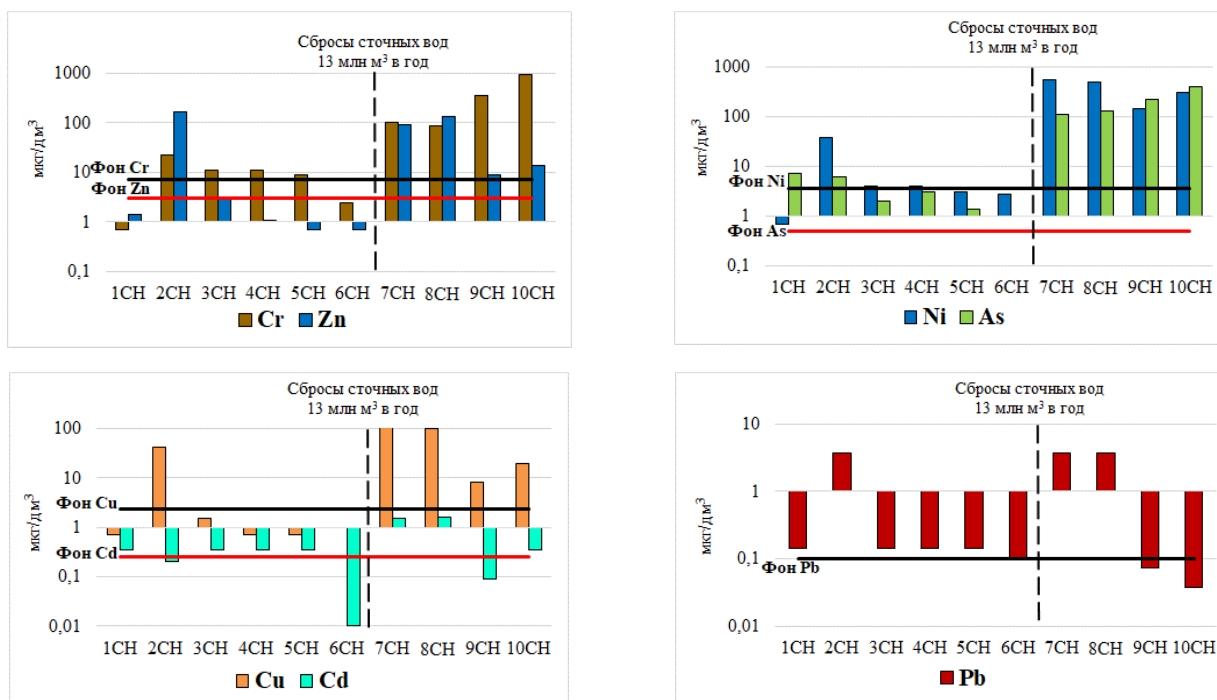


Рисунок 3.3.5 – Распределение микроэлементов в водах р. Чёрной

Наибольший уровень загрязнения по ИЗВ с учетом медианных значений этого показателя зафиксирован в р. Чёрной (ИЗВ = 4,7, «грязные воды»), при этом значения ИЗВ варьировались от 0,46 («чистые воды») до 29,1 («чрезвычайно грязные воды»). В нижнем течении р. Чёрной зафиксированы наибольшие значения интегральных экологических индексов, где воды характеризуются как чрезвычайно грязные по ИЗВ, по ERI и HEI отмечен очень высокий и высокий уровень загрязнения вод соответственно. Медианные значения индекса HEI и ERI соответствуют низкому уровню загрязнения вод (таблица, 3.3.2, рисунок 3.3.6).

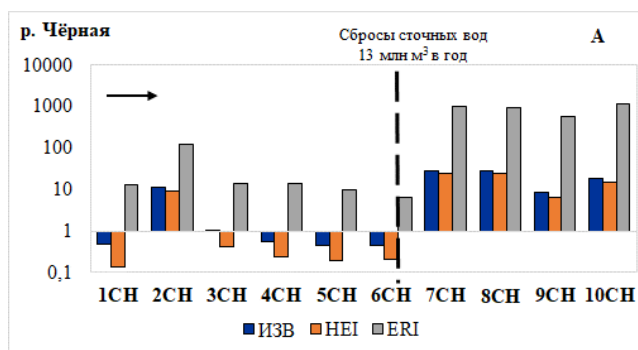


Рисунок 3.3.6 – Экологическая оценка уровня загрязнения вод микроэлементами в р. Чёрной

Корреляционный анализ между катионами и анионами в пробах речных вод р. Чёрной выявил три группы элементов, имеющих высокую положительную значимость: 1) HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} ; 2) SO_4^{2-} - K^+ - Na^+ - Cl^- ; 3) Cl^- - Mg^{2+} - Na^+ - K^+ - Ca^{2+} . Это свидетельствует о смешении вод различного состава (таблица 3.3.4). Выявлена значительная положительная корреляция между микро- и макрокомпонентами, которые также подтверждают разные источники поступления элементов. Так, Cr имеет высокие положительные корреляции ($0,77 \leq r \leq 0,96$, $p < 0,05$) с K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} и Cl^- среди основных ионов, отмечена сильная связь этого элемента и с As.

Таблица 3.3.4 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микрокомпонентами в речных водах в бассейне р. Чёрной ($n=10$)

	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
HCO_3^-	1,00	0,04	0,52	0,88	0,73	0,10	-0,03	0,01	0,88	0,91	0,58	0,22	0,91	0,73
SO_4^{2-}		1,00	0,78	0,33	0,51	0,93	0,94	0,90	0,31	-0,05	-0,23	0,90	-0,08	-0,28
Cl^-			1,00	0,81	0,90	0,89	0,81	0,77	0,79	0,51	0,19	0,92	0,45	0,22
Ca^{2+}				1,00	0,93	0,45	0,32	0,30	0,98	0,88	0,48	0,54	0,86	0,61
Mg^{2+}					1,00	0,65	0,51	0,42	0,86	0,70	0,38	0,66	0,68	0,44
Na^+						1,00	0,98	0,92	0,43	0,08	-0,09	0,97	-0,01	-0,14
K^+							1,00	0,96	0,32	-0,04	-0,17	0,96	-0,13	-0,25
Cr								1,00	0,35	-0,01	-0,14	0,96	-0,08	-0,21
Ni									1,00	0,90	0,51	0,55	0,87	0,65
Cu										1,00	0,79	0,21	0,91	0,91
Zn											1,00	-0,01	0,55	0,96
As												1,00	0,13	-0,04
Cd													1,00	0,72
Pb														1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

Значительные положительные корреляции ($0,79 \leq r \leq 0,98$, $p < 0,05$) были обнаружены для Ni с основными ионами катионами – Ca^{2+} , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} и Cl^- , а также с Cu и Cd. Сильная положительная корреляция ($0,70 \leq r \leq 0,91$) выявлена между Cu и HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , среди

элементов – с Cd и Zn. При этом не обнаружено статистически значимых корреляций между макрокомпонентами и Zn, которые положительно коррелирует только с Pb. Сильная положительная корреляция ($0,91 \leq r \leq 0,97$) отмечена между As и Na^+ , K^+ , Cl^- и SO_4^{2-} , а также с Cr. Статистически значимая корреляция выявлена между Cd и HCO_3^- , Ca^{2+} , а также с Cu, Ni, Pb. Положительная корреляция Pb выявлена только с HCO_3^- среди макрокомпонентов, а также с Zn, Cu и Cd.

Пестрый гидрохимический состав речных вод в бассейне р. Чёрной со значимыми связями между макро- и микрокомпонентами обусловлен разным уровнем техногенного воздействия в пределах водосбора реки за счет как точечных, так и диффузных источников загрязнения. Наибольшее техногенное воздействие зафиксировано после сброса сточных вод химических предприятий за 3,5 км от устья.

Бассейн реки Толыч

Несмотря на то, что самый большой объем сброса сточных вод (до 53 млн. м³ в год) среди исследованных объектов рассматриваемой территории осуществляется в р. Толыч с площадью водосбора $F=36,1 \text{ км}^2$, где до 47% территории занято промышленными объектами, качество вод этой реки варьируется от низкого до среднего уровня загрязнения в зависимости от применяемого интегрального показателя (рисунок 3.3.7).



Рисунок 3.3.7 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения вод р. Толыч

Максимальные концентрации исследованных элементов в воде р. Толыч выявлены на разных участках бассейна (рисунок 3.3.8). Так в верхнем течении до поступления задекларированных источников загрязнения выявлены максимальные содержания Zn и As относительно фона. После сбросов сточных вод от металлургического предприятия выявлено максимальное содержание Cu, что может быть связано со сбросами сточных вод, где в перечне загрязняющих веществ имеется этот элемент.

Наибольшие значения Cr зафиксировано после сбросов сточных вод энергетического предприятия, при этом данный элемент не входит в перечень загрязняющих веществ при сбросе

сточных вод. В нижнем течении реки после сбросов сточных вод химического предприятия зафиксированы максимальные концентрации Ni и Pb, которые также не входят в перечень загрязняющих веществ при сбросе сточных вод. Кроме того, в бассейне р. Толыч отмечается стопроцентное превышение проб относительно фоновых значений для исследуемых микрокомпонентов в воде (таблица 3.3.1). В результате вариативности содержаний элементов в бассейне этого объекта уровень загрязнения вод во всех точках по ИЗВ и ЕРИ соответствует умеренному загрязнению, по НЕИ – низкому, несмотря на самый больший объем сточных вод, поступающих в акватории исследуемых малых рек в Соликамско-Березниковской агломерации.

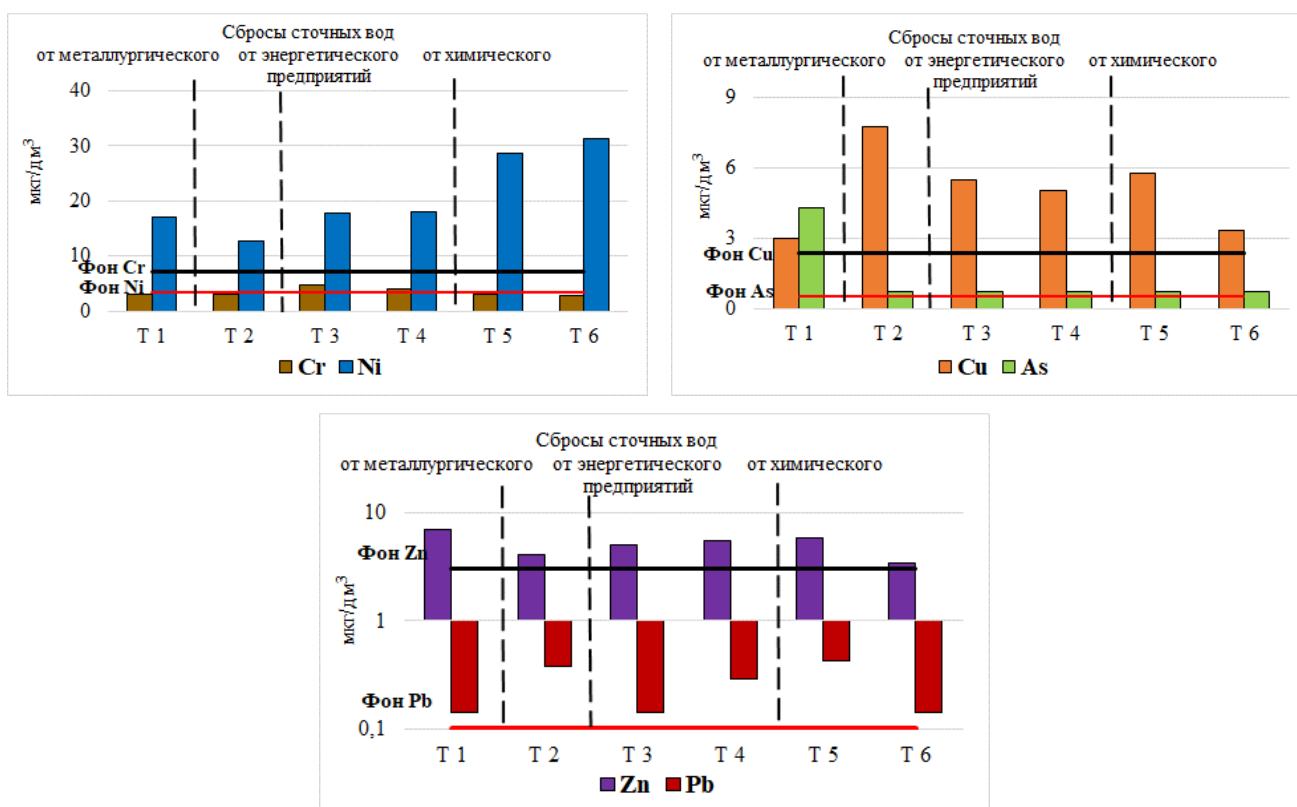


Рисунок 3.3.8 – Распределение микроэлементов в водах р. Толыч

Результаты коэффициентов корреляции между макро- и микрокомпонентами в воде р. Толыч представлены в таблице 3.3.5. Среди основных ионов выявлена положительная значимая корреляция ($p < 0,05$, $0,84 < r < 0,98$) между Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} и K^+ . Несмотря на высокие концентрации Ni, Cu, Zn, Pb в водах, значимых корреляций между макро- и микрокомпонентами выявлено не было. Сильные отрицательные связи отмечены между Cu и Cl^- , Ca^{2+} и Na^+ .

Таблица 3.3.5 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микрокомпонентами в речных водах в бассейне р. Толыч ($n=6$)

	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb
HCO ₃ ⁻	1,00	0,75	-0,44	-0,26	0,03	0,06	-0,40	0,99	-0,27	0,11	0,04	-0,35	-0,26
SO ₄ ²⁻		1,00	-0,35	-0,20	0,34	0,12	-0,12	0,69	-0,24	0,04	0,11	-0,30	0,01
Cl ⁻			1,00	0,98	0,68	0,70	0,84	-0,45	0,09	-0,83	0,43	0,89	-0,61
Ca ²⁺				1,00	0,76	0,74	0,84	-0,26	-0,02	-0,84	0,49	0,91	-0,70
Mg ²⁺					1,00	0,47	0,87	0,05	-0,35	-0,56	0,74	0,78	-0,34
Na ⁺						1,00	0,40	-0,04	0,36	-0,94	0,03	0,39	-0,84
K ⁺							1,00	-0,37	-0,11	-0,60	0,77	0,92	-0,22
Cr								1,00	-0,37	0,18	0,13	-0,29	-0,22
Ni									1,00	-0,44	-0,26	-0,25	-0,04
Cu										1,00	-0,28	-0,57	0,74
Zn											1,00	0,71	-0,01
As												1,00	-0,42
Pb													1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

Такие высокие концентрации меди возможно связано с геологическим строением территории, а именно подстилающими шешминскими породами. При этом Cr связан с HCO₃⁻, поскольку была выявлена сильная положительная корреляция ($p < 0,05$, $r=0,99$). Кроме того, положительная корреляция ($p < 0,05$, $0,89 < r < 0,92$) наблюдалась между As и Cl⁻, Ca²⁺ и K⁺, что связано с высокоминерализованными водами, поступающих в бассейн реки Толыч из разных источников. В бассейне р. Толыч ранее отмечались высокие концентрации меди, цинка и свинца в речных водах, которые поступают в воды из твердой фазы, о чем свидетельствуют результаты расчета миграционной способности (Log(Kd) (Ушакова, 2022).

Бассейн реки Зырянки

Результаты интегральных показателей загрязнения речных вод в бассейне р. Зырянки свидетельствует о разном уровне загрязнения в пределах исследуемого бассейна (рисунок 3.3.9). При использовании индекса HEI, основанного на использовании нормативов для водных объектов рыбохозяйственного значения, отмечен низкий уровень загрязнения вод. Результаты расчета ИЗВ выявили 3 класс качества вод в бассейне реки с преобладанием чистых вод. Использование индекса ERI выявило 4 категории экологического риска: от низкого до очень высокого (до 32% проб).

В пределах водосборного бассейна р. Зырянки на участке между водохранилищами в левобережных притоках выявлены максимальные превышения Cr, Ni, As, Cd относительно фоновых значений, здесь также зафиксирован рост минерализации (до 8,7 г/л) с хлоридно-натриевой фацией вод (рисунок 3.3.10). На трансформацию химического состава вод на этом

участке оказывает родниковая разгрузка, связанная с перетоками подземных вод (с минерализацией до 3 г/л) из соляно-мергельной толщи (нижнесоликамская подсвита (P_{1sl_2})), терригенно-карбонатной толщи (верхнесоликамская подсвита (P_{1sl_1})) (Максимович, Первова, 2012), происходит миграция соленых вод от объектов производственной деятельности калийных предприятий.

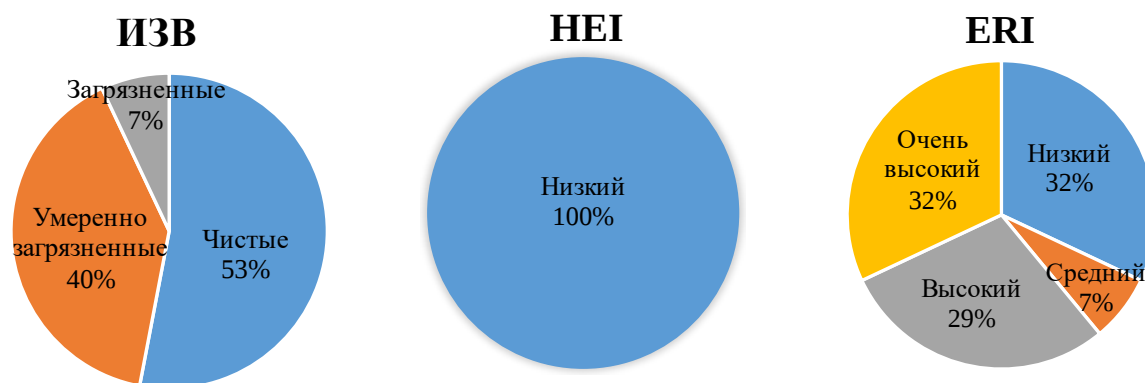


Рисунок 3.3.9 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения вод р. Зырянки

Максимальное содержание Pb и Cu относительно фона выявлено в пределах левобережных ручьев Верхне-Зырянского водохранилища, что связано с естественными причинами, поскольку в пределах этой части водосбора отсутствуют источники техногенного воздействия. В результате вариативности содержаний микроэлементов в бассейне р. Зырянки уровень загрязнения вод во всех точках опробования изменяется от низкого по HEI, умеренно загрязненного по ИЗВ и до очень высокого по ERI.

Качество вод р. Зырянки от Верхне-Зырянского водохранилища до устьевой части подвержено техногенному воздействию за счет поступления стока р. Быгель, где в устьевой части зафиксированы повышенные концентрации Cr, Ni, As и Zn, а также Sr, Fe и Mn, а также разгрузка высоминерализованных родников хлоридно-кальциевого состава с минерализацией до 9,5 г/дм³ и ливневые стоки с городской территории (Ушакова и др., 2022; Максимович и др., 2021).

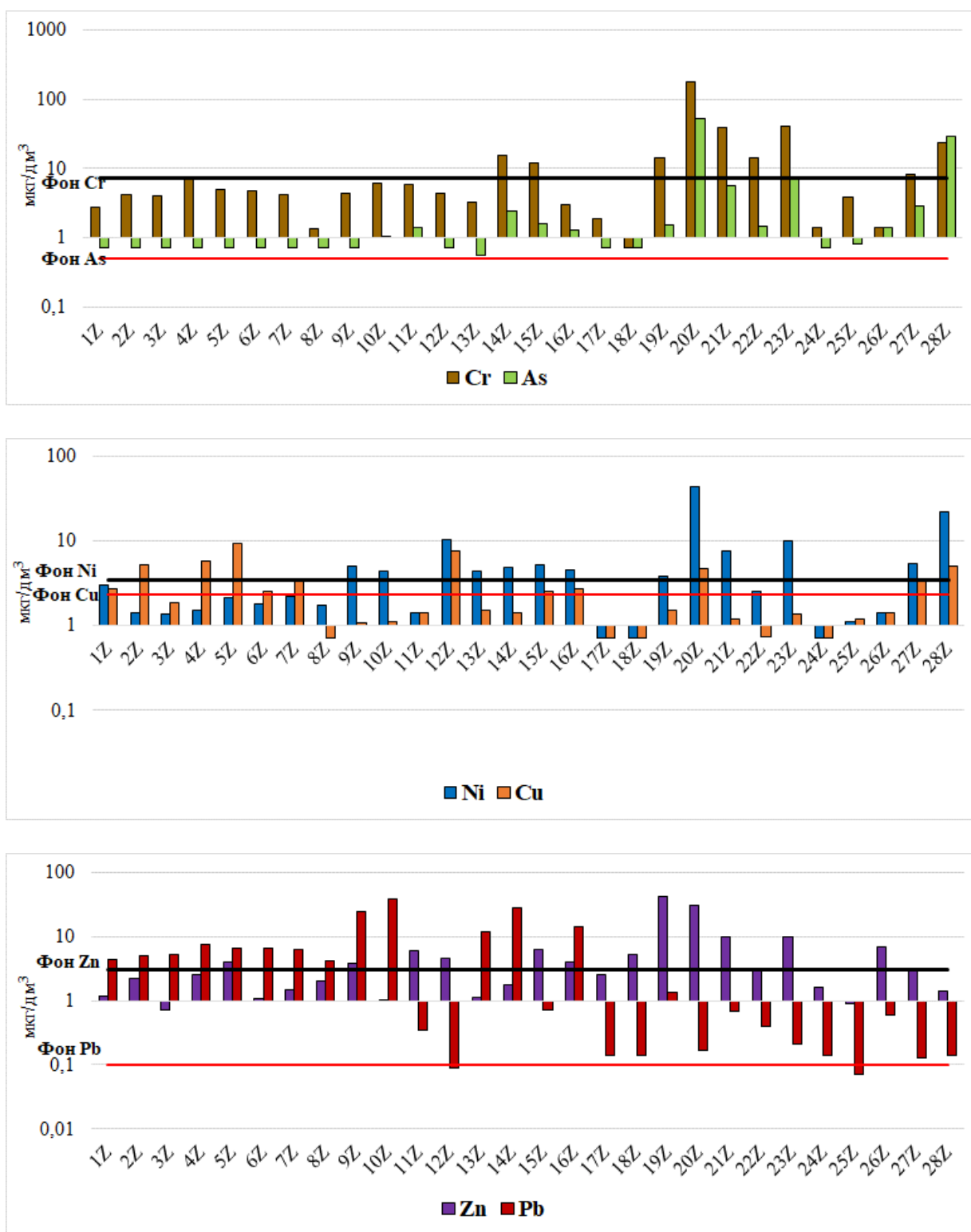


Рисунок 3.3.10 – Распределение микроэлементов в водах р. Зырянки

Коэффициента корреляции между основными макрокомпонентами показали положительную корреляцию ($0,97 < r < 0,99$) между Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} (таблица 3.3.6). Из корреляционной матрицы для речных вод этого объекта видно, что с основной группой ионов Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} сильно коррелируют ($0,86 < r < 0,98$) Cr, Ni и As, что указывает на один источник

поступления этих веществ, в качестве которого могут выступать естественная разгрузка высокоминерализованных вод из родников, не декларируемые фильтрационные разгрузки от шламохранилищ и солеотвалов. Цинк показал умеренную корреляцию ($0,50 < r < 0,59$) со многими макро- и микрокомпонентами, за исключением HCO_3^- , K^+ и Cu, с которыми корреляция отсутствует. Отрицательная корреляция выявлена у Cd и Pb со всеми макро- и микрокомпонентами.

Таблица 3.3.6 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микрокомпонентами в речных водах в бассейне р. Зырянки ($n=28$)

	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl ⁻	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
HCO_3^-	1,00	0,41	0,06	0,13	0,10	0,06	-0,04	0,06	0,00	-0,43	0,09	-0,07	-0,20	0,23
SO_4^{2-}		1,00	0,41	0,44	0,45	0,41	-0,07	0,46	0,45	-0,22	0,50	0,44	-0,34	-0,14
Cl ⁻			1,00	1,00	0,99	0,99	-0,06	0,98	0,88	0,13	0,56	0,87	-0,10	-0,19
Ca^{2+}				1,00	0,99	0,99	-0,11	0,97	0,87	0,10	0,55	0,86	-0,12	-0,17
Mg^{2+}					1,00	0,97	-0,12	0,98	0,87	0,10	0,57	0,86	-0,10	-0,15
Na^+						1,00	-0,02	0,98	0,89	0,14	0,55	0,88	-0,11	-0,21
K^+							1,00	-0,04	-0,05	-0,08	0,00	-0,03	0,15	-0,20
Cr								1,00	0,92	0,14	0,59	0,91	-0,13	-0,15
Ni									1,00	0,28	0,49	0,97	-0,23	-0,12
Cu										1,00	0,01	0,23	-0,04	-0,13
Zn											1,00	0,46	-0,16	-0,23
As												1,00	-0,18	-0,18
Cd													1,00	0,42
Pb														1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

3.4 Эколого-геохимическая оценка донных отложений малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Среди исследованных объектов наибольшие концентрации микроэлементов в донных отложениях выявлены в р. Черной (г. Соликамск) и р. Толыч (г. Березники) (таблица 3.4.1). С увеличением техногенного воздействия к нижнему течению исследованных малых рек концентрации исследованных элементов в водах и донных отложениях увеличиваются. Так наибольшее содержание (в мг/кг) Ni (до 850), Zn (до 725), Cu (до 376), Pb (до 138) и As (до 52) зафиксировано в нижнем течении р. Чёрной, а Cd (до 11) и Hg (до 2) в нижнем течении р. Толыч.

Условно фоновые концентрации исследованных элементов в донных отложениях рассматриваемой территории существенно ниже кларков верхней части континентальной коры, за исключением Cd (рисунок 3.4.1). Наибольшая степень обогащения исследованными элементами в донных отложениях относительно кларков зафиксирована в р. Толыч со

следующим рядом распределения элементов: $Cd > Hg > Cu > Zn > As > Ni > Pb$. Донные отложения р. Усолки обеднены Ni, Cu, Zn, As, Pb по сравнению с кларками, в р. Чёрной – As, Zn, Pb, а в р. Зырянке – Ni, Cu, Zn, As, Hg, Pb. При этом среднее содержание Cd, Hg в р. Усолке в 3 раза выше кларковых значений. В р. Чёрной увеличение концентраций Cd, Hg, Ni, Cu по сравнению с кларковыми отмечено в диапазоне от 3 до 1,2 раз, а в р. Зырянке только по Cd – в 6 раз.

Таблица 3.4.1 – Содержание микроэлементов в донных отложениях (мг/кг) малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

	г. Соликамск				г. Березники				Условный фон фон (среднее)
	р. Усолка		р. Чёрная		р. Толыч		р. Зырянка		
	Диапазон среднее	CV,%	Диапазон среднее	CV,%	Диапазон среднее	CV,%	Диапазон среднее	CV,%	
Ni	1.13 – 53.8 16,22	84	5.0 – 850.94 76,90	128	12.64 – 178.49 62,44	94	2.90 – 57.00 29,41	46	11,33
Cu	0.58 – 33.2 10,62	71	6.80 – 376.62 33,62	79	13.34 – 99.31 65,26	47	0.63 – 48.47 23,52	46	10,65
Zn	8.4 – 179.8 32,52	105	16.2 – 725.23 64,46	78	43.96 – 379.33 181,89	62	3.54 – 69.48 32,34	69	20,85
As	< 0.1 – 9.80 2,96	82	1.04 – 52.90 4,71	50	2.84 – 13.78 8,28	51	0.15 – 10.96 4,57	60	5,23
Cd	<0.05 – 0.82 0,30	82	0.06 – 3.55 0,32	8	<0.05 – 11.34 2,72	158	<0.05 – 1.96 0,56	104	0,37
Pb	1.11 – 31.50 9,10	67	3.30 – 138.08 12,25	106	< 0.1 – 50.31 18,34	92	1.50 – 19.70 13,37	37	5,17
Hg	<0.03 – 0.77 0.24	80	< 0.03 – 1.51 0.14	141	1.35 – 2.74 1.96	26	<0.03 – 0.65 0.06	203	0,02

Согласно значениям коэффициента вариации, совокупность данных по содержанию микроэлементов в донных отложениях в исследуемых малых реках неоднородная, что свидетельствует о значительном вкладе техногенных источников в сравнении с естественными факторами на водосборе рек.

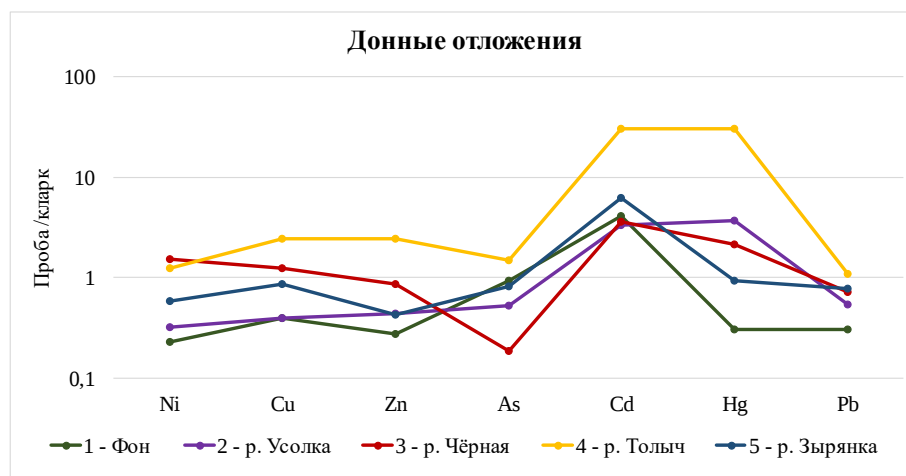


Рисунок 3.4.1 – Средние содержания микроэлементов и условный фон, нормированные по кларку (1 – фон; 2 – р. Усолка; 3 – р. Чёрная; 4 – р. Толыч; 5 – р. Зырянка)

При сравнении концентраций исследуемых элементов в донных отложениях малых рек с фоновыми значениями выявлен наибольший уровень превышения по Ni (в 75 раз), Cu и Zn (в 35 раз), Pb (в 27 раз), As (в 10 раз) в *р. Чёрной*, по Hg (в 137 раз) и Cd (в 31 раз) – в *р. Толыч*. Наибольшая доля проб, превышающих фоновые значения, в *р. Усолке* установлена по Hg – 96%, далее 72% проб по Pb, 56% проб по Ni, 48% проб по Zn, 40% проб по Cu, 32% проб по Cd и 16 % проб по As (таблица 3.4.2).

Содержание Ni и Cu в *р. Чёрной* превышает фоновые значения в 90% проб, в 80% проб зафиксированы превышения по Zn, в 70 % проб – по Pb и Hg, в 50% проб – по Zn, в 50% проб – по As, в 30% проб – по Cd. Для Ni, Cu, Zn и Hg во всех пробах зафиксировано превышение относительно фоновых проб в *р. Толыч*, а также в 85 % проб по Cd и Pb, и 68% проб по As. Превышения фоновых значений зафиксированы в *р. Зырянке* в 93% проб по Pb и Hg, в 89% проб по Ni, в 86 % по Cu, в 64% проб по Zn, в 43% проб по As и Cd.

В России отсутствует система нормирования донных отложений на основании ПДК. При этом имеется ряд нормативных документов, где рекомендуется оценка загрязнения металлами и металлоидами донных отложений на основании сравнения с ПДК для почв (СанПиН 1.2.3685-21). В донных отложениях бассейна *р. Усолки* при использовании этого подхода отсутствуют превышения по содержанию исследованных элементов во всех пробах, а в *р. Чёрной* нормативные значения для почв превышены только в 30% проб по Ni (до 3 раз) и в 10% проб по Zn (в 1,4 раза), которые зафиксированы в среднем и нижнем течении реки после сбросов сточных вод. В бассейне *р. Толыч* выявлены разовые превышения относительно ПДК для почв по Ni, Zn, Hg и Cd, в бассейне *р. Зырянки* – разовое незначительное превышение по As.

Таблица 3.4.2 – Доля проб донных отложений рек Соликамско-Березниковской агломерации, имеющих превышения содержаний микроэлементов относительно ПДК и фоновых значений, %

	р. Усолка	р. Чёрная	р. Толыч	р. Зырянка
Ni	– / 56	30 / 90	17 / 100	– / 89
Cu	– / 40	– / 90	– / 100	– / 86
Zn	– / 48	10 / 80	17 / 100	– / 64
As	– / 16	– / 50	– / 68	5 / 43
Cd	– / 32	– / 30	34 / 85	– / 43
Pb	– / 72	– / 70	– / 85	– / 93
Hg	– / 96	– / 70	34 / 100	– / 93

Примечание: черный цвет – превышения относительно ПДК для почв; оранжевый цвет – превышения относительно фона.

Сравнение содержаний микроэлементов в донных отложениях малых рек Соликамско-Березниковской агломерации с концентрациями элементов в донных отложениях других рек Пермского края представлен в таблице 3.4.3. Несмотря на высокие концентрации

микроэлементов в донных отложениях р. Толыч и р. Чёрная, максимальные концентрации Ni, Cu, Zn выявлены в осадках долины р. Егошихи (г. Пермь) в среднем течении, свидетельствующие о значительном влиянии на качество донных отложений урбанизированной территории в пределах ее водосбора (таблица 3.4.3).

Таблица 3.4.3 – Среднее содержание микроэлементов в донных отложениях рек Пермского края

Река	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Ссылки
Соликамско-Березниковская агломерация								Результаты данного исследования
р. Усолка	16,22	10,62	32,52	2,96	0,30	9,10	0,24	
р. Чёрная	76,90	33,62	64,46	4,71	0,32	12,25	0,14	
р. Толыч	62,44	65,26	181,89	8,28	2,72	18,34	1,96	
р. Зырянка	29,41	23,52	32,34	4,57	0,56	13,37	0,06	
Пермский край								
р. Кама (выше а/д моста) г. Березники	40,04	91,57	52,51	5,08	0,18	5,6	н/о	Ушакова и др., 2023
р. Косьва	41,92	33,05	61,46	2,91	0,93	36,54	2,59	Ushakova et al., 2022
Косьвинский залив (Камское вдхр.)	54,70	66,69	105,98	5,73	0,47	14,63	1,44	Ushakova et al., 2022
р. Егошиха, среднее течение	142,40	124,70	241,80	6,70	5,75	19,10	0,15	Ушакова и др., 2023

Сопоставимый уровень загрязнения микроэлементами донных отложений в бассейне р. Чёрной и р. Толыч отмечен в бассейне р. Косьвы на значительном протяжении реки вплоть до Косьвинского залива. Необходимо отметить высокое содержание Cu, а также Ni и Zn в р. Каме в районе г. Березники, при этом концентрации по меди в этих водах являются региональной особенностью, связанной с составом пород верхней части геологического разреза.

Геохимическая специфика донных отложений значительно отличается от речных вод в исследуемых малых реках (таблица 3.4.4). Использование средних значений K_c выявило геохимические аномалии в донных отложениях исследуемых рек по содержанию Hg в р. Толыч и р. Усолке. Высокие значения K_c (диапазон значений 3-10) в р. Чёрной (Ni, Hg, Cu, Zn) и р. Толыч (Zn, Cd, Cu, Ni, Pb) также свидетельствуют об аномальном содержании этих элементов в донных отложениях. Следует отметить, что Hg и Cd являются распространенными поллютантами в техногенных геохимических ассоциациях донных отложений рек промышленно-урбанизированных районов, в частности в Московской области, что связано с наиболее интенсивной аккумуляцией элементов, отличающихся «малым» кларком и (или) повышенной токсичностью в техногенных илах (Янин, 2002).

Таблица 3.4.4 – Геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Реки	Порядок значений K_c химических элементов			
	>30	30-10	10-3	3-1,5
р. Усолка	-	Hg ₁₁	-	Pb, Zn
р. Чёрная	-	-	(Ni-Hg) ₇ , (Cu-Zn) ₃	Pb
р. Толыч	Hg ₉₈	-	(Zn-Cd) ₉ , Cu ₆ , Ni ₅ , Pb ₄	As
р. Зырянка	-	-	-	Hg, Pb, Ni, Cu, Zn, Cd

Результаты расчета индекса геоаккумуляции I_{geo} в пределах исследуемых малых рек подтверждают результаты расчета коэффициентов концентрации, для которого также сохраняются высокие значения преимущественно по Hg и Cd (таблица 3.4.5). Медианные значения I_{geo} в исследуемых реках по Hg варьировались от -1,7 до 4,3. Для этого элемента наивысший уровень зафиксирован в р. Толыч (от высокого до чрезвычайного загрязнения) и р. Усолке (умеренное загрязнения), в остальных водотоках уровень загрязнения соответствует незагрязненным осадкам. Высокий уровень загрязнения Cd по индексу геоаккумуляции установлен в р. Толыч, а умеренный уровень загрязнения в р. Усолке, в остальных водотоках отмечен низкий уровень загрязнения. Медианные значения индекса геоаккумуляции по Ni и Pb во всех донных отложениях исследуемых малых рек соответствуют низкому уровню загрязнения, а по Cu, Zn, As – от низкого до умеренного уровня загрязнения.

Таблица 3.4.5 – Медианные значения индексов геоаккумуляции I_{geo} для донных отложений бассейнов рек г. Соликамска и г. Березники

Элемент	р. Усолка	р. Чёрная	р. Толыч	р. Зырянка
Ni	-2,53	-1,98	-0,72	-1,36
Cu	-2,12	-0,87	0,92	-0,76
Zn	-2,45	-1,23	0,63	-1,91
As	-1,87	-0,67	0,15	-1,11
Cd	0,89	0,95	3,11	1,23
Hg	1,24	-1,20	4,30	-1,70
Pb	-1,55	-1,63	-0,66	-0,95

Примечание: цвет ранжирует значения индекса (более высокие значения отмечены более интенсивным цветом)

Несмотря на высокий уровень загрязнения микроэлементами поверхностных вод в р. Чёрной, уровень загрязнения донных отложений по интегральным индексам является одним из самых низких среди исследованных объектов. Так на основании среднего значения Z_c донные отложения этого объекта соответствует среднему уровню загрязнения, PECQ – слабому неблагоприятному воздействию на биоту, RI – умеренному потенциальному экологическому риску (рисунок 3.4.2, таблица 3.4.6).

Высокий уровень загрязнения донных отложений выявлен в р. Толыч, где при этом зафиксирован низкий уровень загрязнения вод микроэлементами. Так в р. Толыч отмечены наибольшие медианные значения по Z_c , которые соответствуют очень высокому уровню загрязнения, RI – чрезмерно высокому уровню загрязнения, что обусловлено высоким содержанием Hg и Cd в донных отложениях (рисунок 3.4.2). Такой высокий уровень загрязнения донных отложений в бассейне р. Толыч отражает уровень техногенного воздействия за длительный период осуществления интенсивной хозяйственной деятельности в пределах водосбора реки.

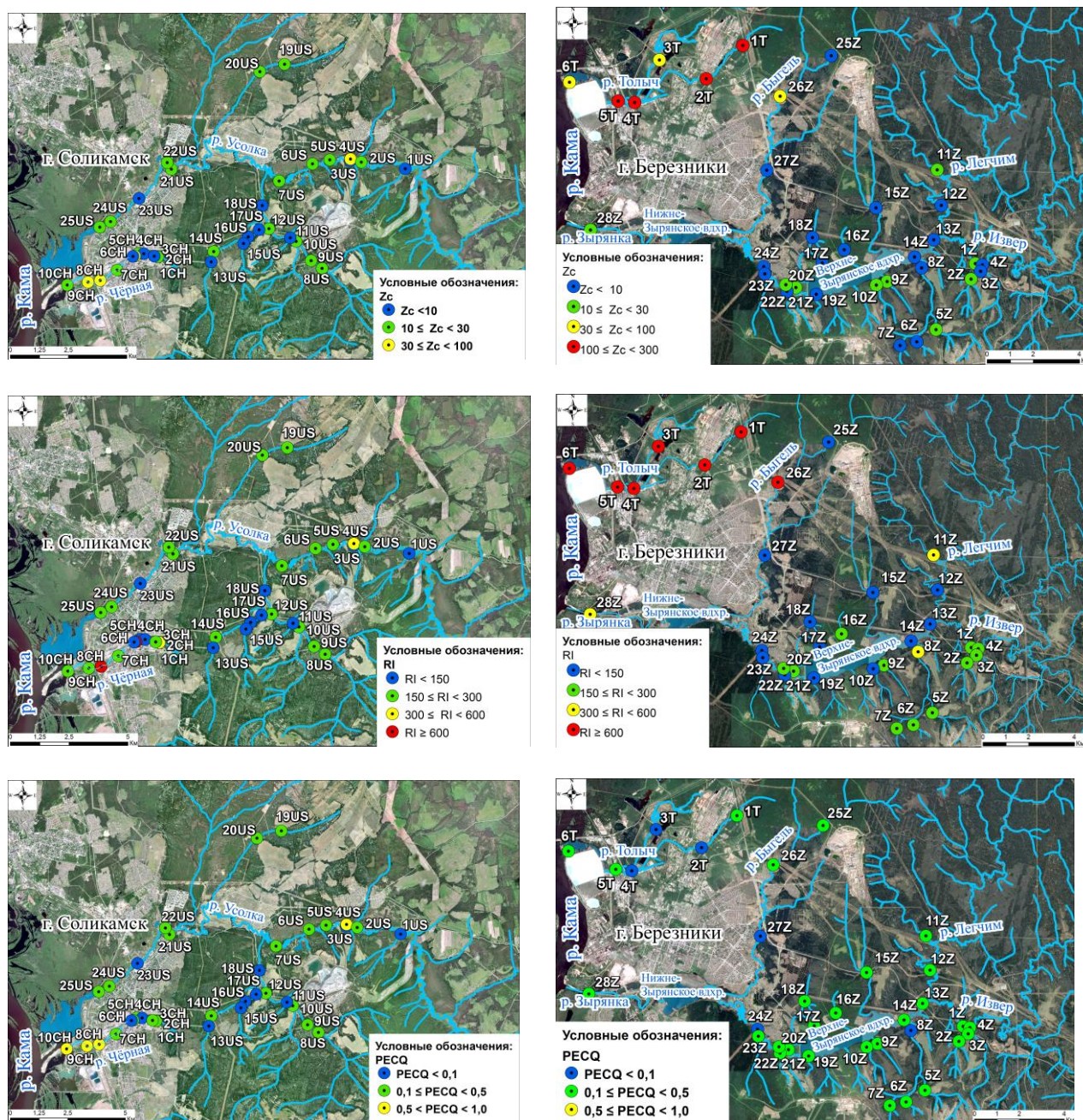


Рисунок 3.4.2 – Распределение показателей экологического состояния донных отложений малых рек на территории Соликамско-Березниковской агломерации

Таблица 3.4.6 – Значения интегральных показателей загрязнения микроэлементами донных отложений исследуемых малых рек

	р. Усолка			р. Чёрная			р. Толыч			р. Зырянка		
	Zc	PECQ	RI	Zc	PECQ	RI	Zc	PECQ	RI	Zc	PECQ	RI
Me	13,2	0,6	493,3	18,2	0,2	214,5	114,2	0,5	3983,3	8,3	0,2	164,1
Mean	13,3	0,7	508,9	18,7	0,3	370,4	125,4	0,5	4246,2	9,2	0,2	211,1
X _{Max}	2,2	0,1	24,4	0,9	0,1	73,0	92,0	0,1	2979,8	0,0	0,0	29,9
X _{Min}	28,8	1,5	1590,6	34,2	0,9	1323,5	168,7	0,8	5672,7	33,4	0,3	1348,8

Примечание: Me – медиана, X_{Max} и X_{Min} – максимальное и минимальное значения выборки

Бассейн р. Усолки

Распределение содержания микроэлементов в донных отложениях бассейна р. Усолки значительно варьируется от верховья до устья, высокие концентрации имеют локальный характер распространения. Результаты оценки уровня загрязнения донных отложений свидетельствуют, что среди микроэлементов наибольший вклад вносит ртуть и в меньшей степени Pb, Zn и Cd, а в некоторых точках опробования – Ni, Cu и As (рисунок 3.4.3).

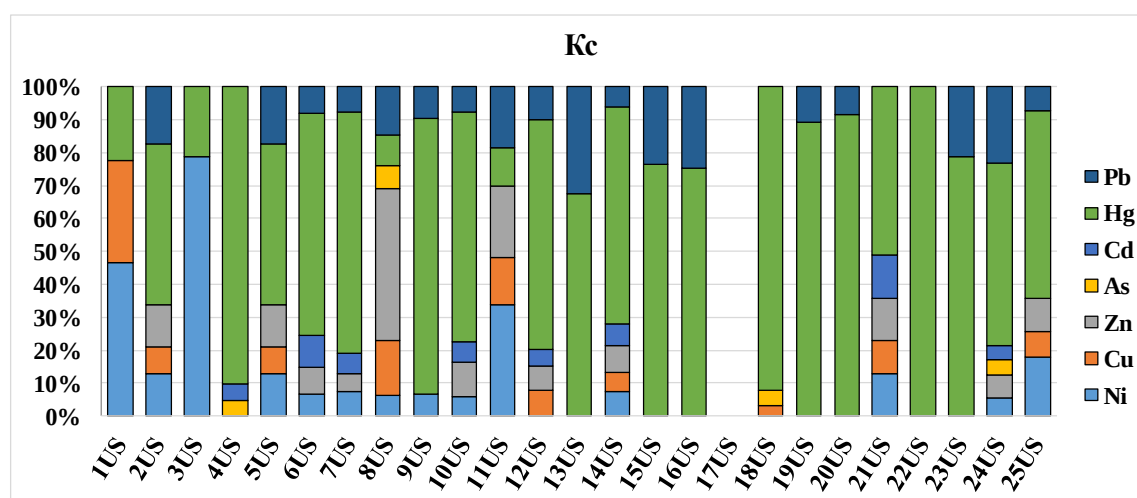


Рисунок 3.4.3 – Распределение коэффициентов концентрации ($K_c > 1$) микроэлементов в донных отложениях бассейна р. Усолки

Интенсивность загрязнения донных отложений бассейна р. Усолки по индексу геоаккумуляции I_{geo} , рассчитанного сравнением со средними значениями содержаний элементов в верхней континентальной коре, характеризуется вариацией от низкого до высокого уровня загрязнения для таких элементов как Cd и Hg. При сравнении с условным фоном в пределах Соликамского-Березниковской агломерации также выявлен высокий вклад Hg в уровень загрязнения донных отложений этого бассейна (рисунок 3.4.4).

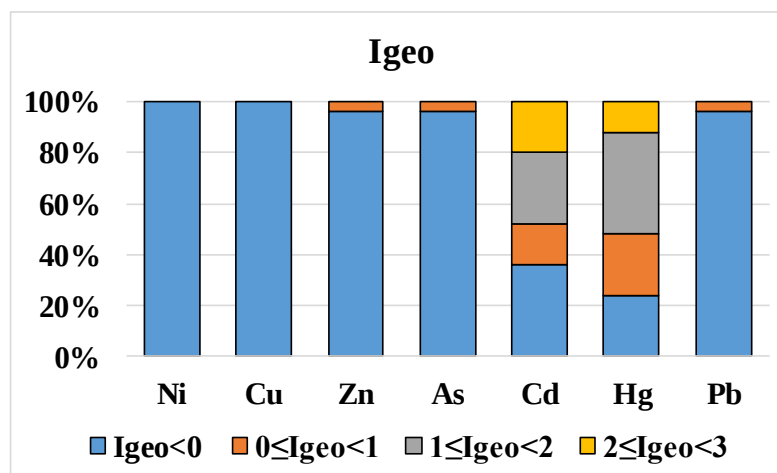


Рисунок 3.4.4 – Процентное распределение значений I_{geo} в донных отложениях бассейна р. Усолки

Использование различных подходов к оценке загрязнения донных отложений р. Усолки демонстрирует разный уровень загрязнения. Большая часть донных отложений бассейна реки Усолки соответствует среднему уровню загрязнения по показателю Z_c , при использовании RI – чрезвычайно высокому и высокому экологическому риску, а расчет индекса $PECQ$ свидетельствует, что донные отложения этого объекта оказывают слабое и умеренное воздействие на биоту (рисунок 3.4.5).

Оценка максимальных значений этих интегральных показателей в донных отложениях р. Усолки демонстрирует по Z_c средний уровень их загрязнения, по RI – чрезмерно высокий экологический риск, а по $PECQ$ – сильное воздействие на биоту.

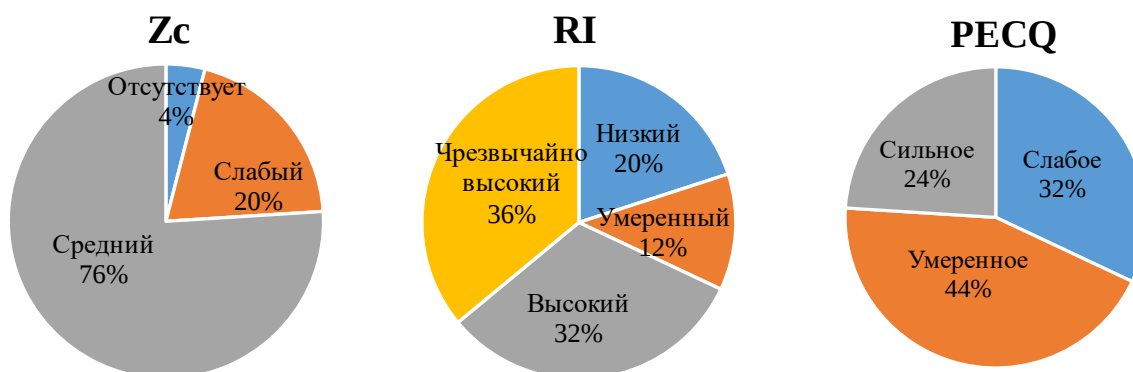


Рисунок 3.4.5 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения донных отложений р. Усолки

В донных отложениях р. Усолки зафиксировано неравномерное распределение микроэлементов в пределах водосборного бассейна (рисунок 3.4.6). Наибольшее превышение относительно фона по содержанию Ni (в 4,7 раза) в донных отложениях выявлено в нижнем течении реки (точка 25US).

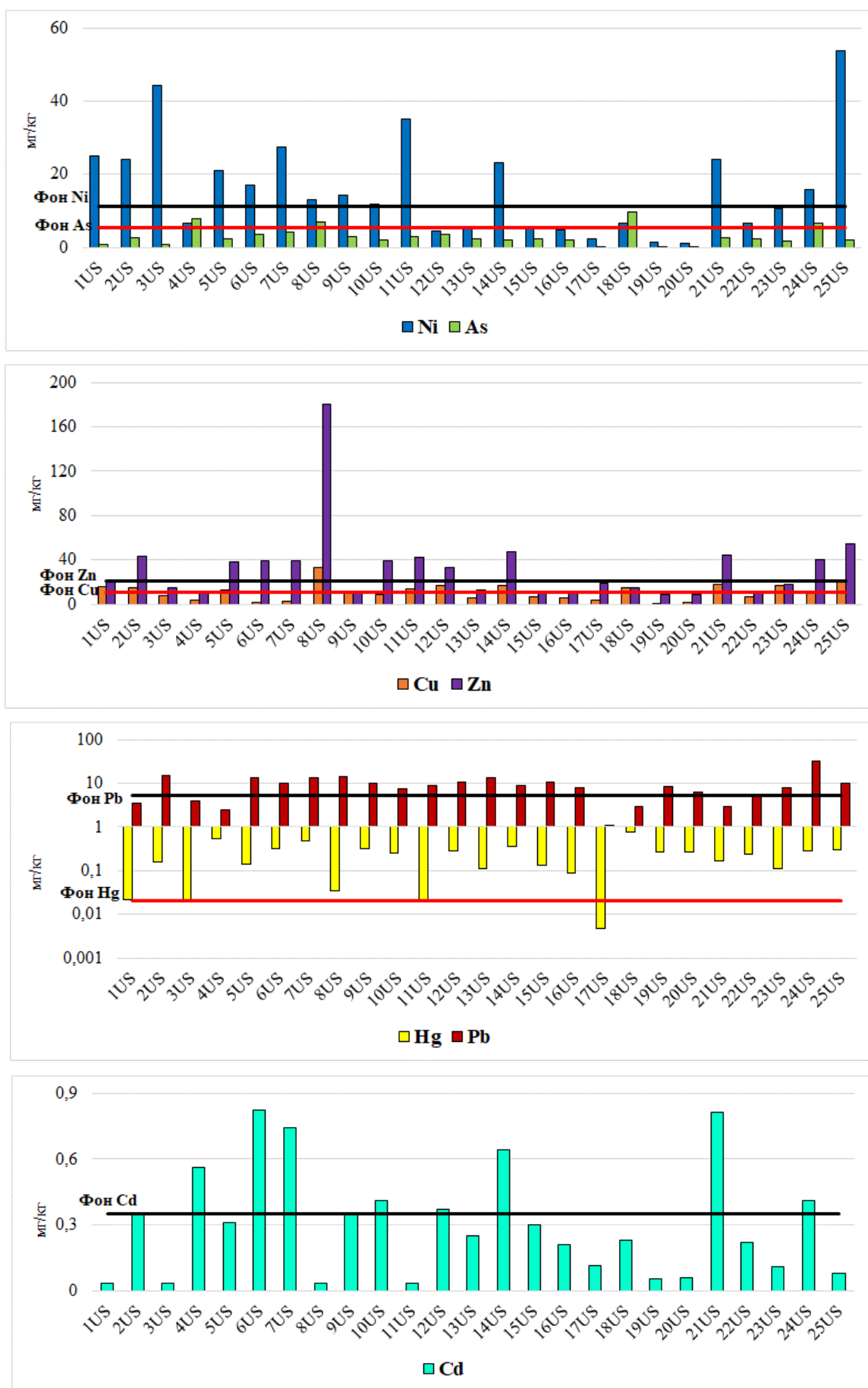


Рисунок 3.4.6 – Распределение микроэлементов в донных отложениях р. Усолки

При этом повышенное содержание Ni относительно фона выявлено в местах родниковой разгрузки. Наибольшие концентрации Zn с превышением фона в 8,6 раза выявлены в верхнем течении р. Селянки (левобережный приток р. Усолки), где в верховье отсутствуют источники техногенного воздействия. Это свидетельствует о природном геохимическом фоне. Остальные превышения относительно фона по Zn в донных отложениях изменяются от 1,5 до 2,6 раза.

В донных отложениях на разных участках р. Усолки выявлены разовые превышения относительно фона по Cu до 3 раз, по Cd до 2,3 раза и по As до 1,8 раза, которые в целом характеризуются низкими концентрациями элементов в бассейне реки. В бассейне этого водотока зафиксировано повсеместное превышение Pb и Hg в донных отложениях, наибольшее превышение Hg зафиксировано в нижнем течении реки (24US) в 38 раз, а Pb в нижнем течении р. Селянки. В обоих случаях это происходит ниже по течению от селитебной территории, которая предполагает наличие необходимой инфраструктуры, поверхностный сток от которой может быть источником аномальных значений элементов на этих участках опробования. С учетом распределения микрокомпонентов в бассейне р. Усолки медианный уровень загрязнения по интегральным экологическим индексам (Zc, PECQ, RI) изменяется от среднего до высокого.

Корреляционный анализ (таблица 3.4.7) свидетельствует, что статистически достоверная положительная ($p < 0,05$) корреляция выявлена между Zn-Cu ($r = 0,75$), умеренная корреляция между As-Hg ($r = 0,63$). Для этого объекта отмечены и повсеместные превышения условно фоновых значений по Zn в 48% проб (до 3 раз), Cu – 40% проб (до 3 раз), что обусловлено геохимической специализацией пород в пределах водосборного бассейна (Калинина и др., 2016; Ворончихина и др., 2012; Копылов, 2021).

Таблица 3.4.7 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между микроэлементами и водородным показателем в донных отложениях бассейна р. Усолки ($n = 25$)

	pH	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
pH	1,00	0,47	0,34	0,22	0,05	0,03	0,02	0,23
Ni		1,00	0,37	0,23	-0,10	0,00	-0,15	0,07
Cu			1,00	0,75	0,29	-0,17	-0,17	0,12
Zn				1,00	0,34	-0,01	-0,19	0,31
As					1,00	0,28	0,63	0,24
Cd						1,00	0,45	0,12
Hg							1,00	-0,02
Pb								1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

Между остальными исследованными элементами значительная корреляция отсутствует, что указывает на поступление элементов от разных источников и с участием различных

механизмов переноса. Различия в корреляциях между элементами в донных отложениях зависят от физических, химических и биологических процессов в водной среде, а также точечных и неточечных источников загрязнения в пределах водосборной площади (Yohannes et al, 2013).

Бассейн р. Чёрной

Результаты расчета индекса геоаккумуляции и коэффициента концентрации, демонстрируют схожие результаты по загрязнению микроэлементами донных отложений р. Чёрной, где наибольший уровень отмечается по Cd и Hg на разных участках реки. Максимальный уровень загрязнения отмечен в верхней части реки в районе пересечения автомобильной дороги до попадания реки в коллектор (от умеренного до высокого по Igeo), что может быть связано с миграцией загрязняющих веществ с поверхностным стоком с прилегающей водосборной площади, где расположены промышленные зоны г. Соликамска. В нижнем течении реки, после сбросов сточных вод, где сток формируется за счет техногенного, наблюдается аккумуляция Ni (Кс до 21), Hg (Кс до 13), Cu (Кс до 8), Zn (Кс до 4) (рисунок 3.4.7).

Согласно рассчитанным интегральным индексам Zс и RI уровень загрязнения донных отложений р. Чёрной варьируется от низкого в верхней части бассейна до чрезвычайно высокого в его нижней части (рисунок 3.4.8). В нижней части реки образцы донных отложений по данным среднего значения PECQ демонстрируют токсичность и высокий потенциальный риск для донной фауны, при этом в верхней части водосбора выявлено отсутствие токсичности образцов донных отложений.

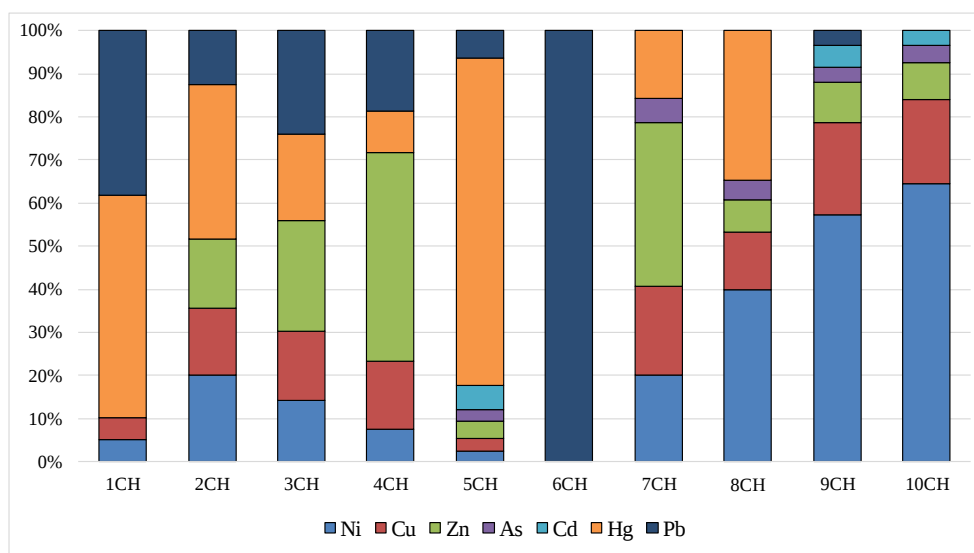


Рисунок 3.4.7 – Распределение коэффициентов концентрации ($K_c > 1$) микроэлементов в донных отложениях р. Чёрной

Помимо выявленных высоких концентраций Ni, Hg, Cu, Zn в рамках данной работы, ранее исследованиями в донных отложениях в нижнем течении р. Чёрной были выявлены высокие

концентрации Co, Li, Mn, Mo, Se, V, представляющие потенциальную опасность вторичного загрязнения Камского водохранилища. В настоящее время нижняя часть исследуемого бассейна в связи с поднятием уровня воды является заливом Камского водохранилища, а сформированные толщи загрязненных осадков за более чем 90-летнюю историю аккумуляции опасных загрязняющих веществ являются долговременным источником загрязнения вод, особенно в период затопления устьевой части р. Чёрной высокими водами (Меньшикова, 2016).

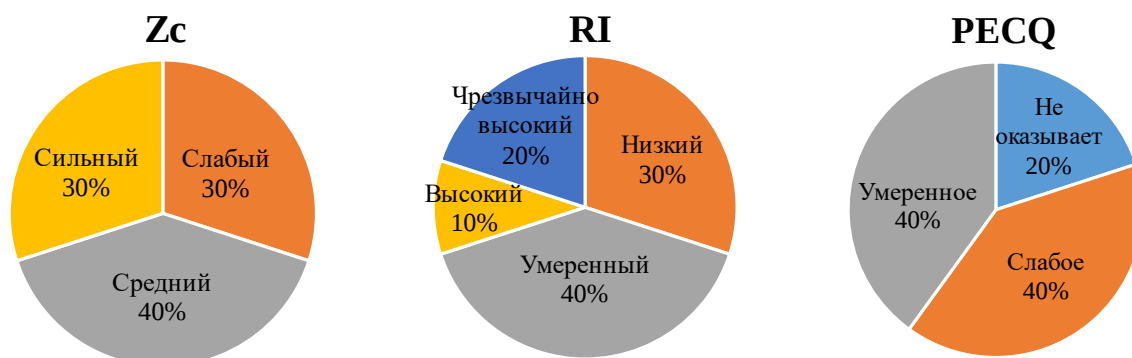


Рисунок 3.4.8 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения донных отложений р. Чёрной

После сбросов сточных вод (на участке от точек опробования 7СН до 10СН) наибольшая аккумуляция элементов в донных отложениях в р. Чёрной зафиксирована по Ni и Cu, где увеличение концентраций относительно фона составило от 3 до 21 раза и от 3 до 8 раз, соответственно. Превышение концентраций As на этом участке составило до 1,6 раза (рисунок 3.4.9). Превышение в 7 раз относительно фона выявлено по Zn в двух точках опробования (4СН и 7СН). Высокие концентрации в точке опробования 4СН возможно связаны с поверхностным стоком с прилегающей промышленной территории. На этом участке реки происходит интенсивная аккумуляция Zn, сопоставимая с аккумуляцией при сбросе сточных вод от химических предприятий.

В донных отложениях р. Чёрной в месте пересечения автомобильной дороги выявлены высокие концентрации Hg и Cd, превышающие фон в 30 раз и в 22 раза, соответственно. Многие исследователи отмечают высокие концентрации геохимически связанных Hg и Cd в донных отложениях в пределах урбанизированных территорий, которые обусловлены промышленными выбросами и атмосферными осадками, а также поверхностным стоком с проезжей части (Mostafa et al., 2024; Gan et al., 2019 Niemiec, 2016). При этом необходимо отметить, что на этом участке (точка 5СН) наличие механического барьера способствовало аккумуляции данных элементов в отложениях перед попаданием реки в коллектор. В верхней части водосбора р. Чёрной до пруда выявлено максимальное содержание Pb, превышающее фон в 9 раз.

Возможным источником поступления и дальнейшей аккумуляции данного элемента рассматривается поверхностный сток с прилегающей промышленной территории.

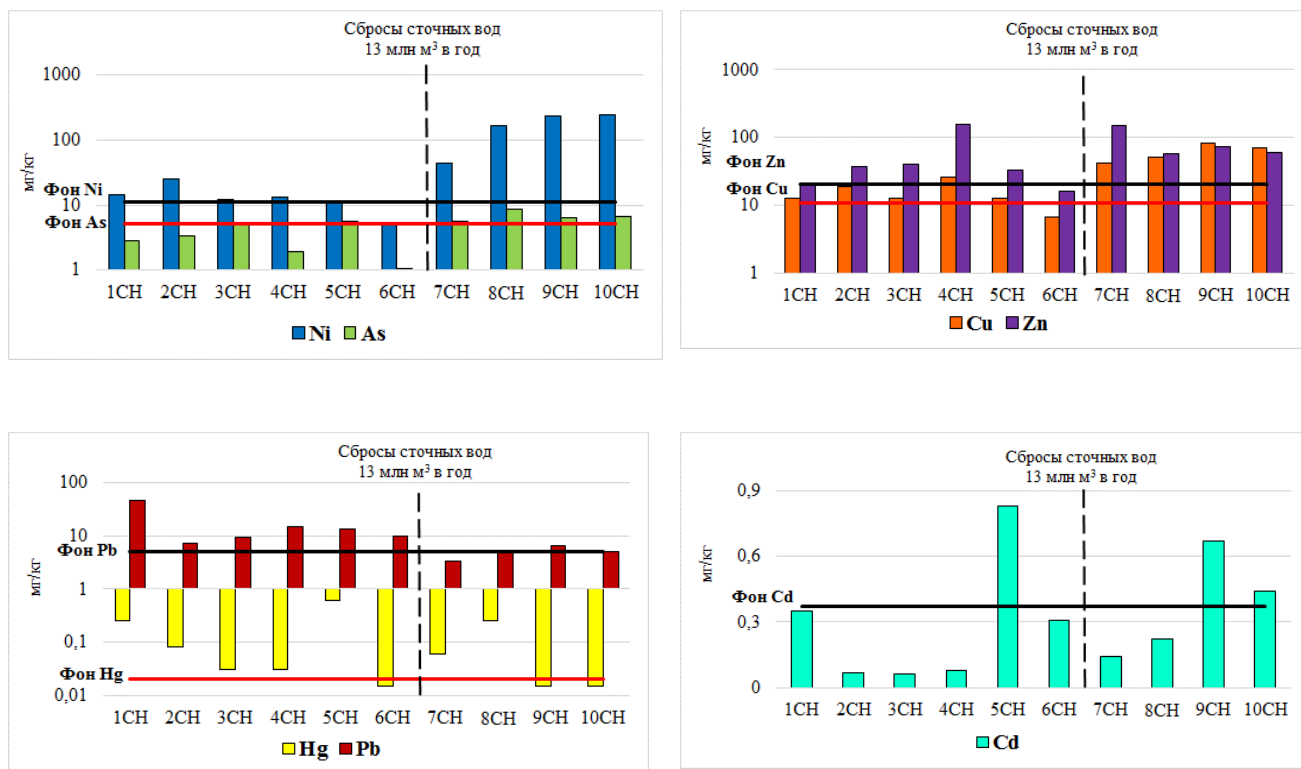


Рисунок 3.4.9 – Распределение микроэлементов в донных отложениях р. Чёрной

Для выявления происхождения и распределения микроэлементов в донных отложениях р. Чёрной проведен корреляционный анализ (таблица 3.4.8). Статистически значимая ($p < 0,05$) корреляция выявлена между Ni-Cu ($r = 0,95$) и Ni-As ($r = 0,70$), что указывает на один источник поступления этих элементов.

Таблица 3.4.8 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микроэлементами в донных отложениях бассейна р. Черная ($n = 10$)

	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	pH
Ni	1,00	0,95	0,05	0,70	0,36	-0,37	-0,24	0,50
Cu		1,00	0,33	0,68	0,28	-0,43	-0,31	0,46
Zn			1,00	0,06	-0,32	-0,30	-0,32	-0,21
As				1,00	0,29	-0,44	0,22	0,66
Cd					1,00	0,08	0,57	0,07
Pb						1,00	0,29	-0,18
Hg							1,00	0,04
pH								1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

Умеренная корреляция выявлена между As-Cu ($r=0,68$) и As-pH ($r=0,66$), что совпадает с высокими концентрациями, связанная с техногенными источниками в пределах бассейна р. Чёрной. Слабая корреляция между ассоциацией Zn-Cd-Pb-Hg указывает на различные техногенные и природные источники их поступления.

Бассейн р. Толыч

Донные отложения р. Толыч на разных участках реки по классификации Г. Мюллера (1969), основанной на индексе геоаккумуляции, соответствуют диапазону от класса 3 (высокий уровень загрязнения по Cd и Hg) до класса 6 (чрезвычайно высокий уровень загрязнения по Cd). При этом Cu, Zn, As также вносят вклад в загрязнение донных отложений этого объекта, достигая умеренного уровня загрязнения.

При сравнении с условным фоном в пределах Соликамского и Березниковского городского округа также выявлен высокий вклад Hg в уровень загрязнения донных отложений в бассейне р. Толыч. В целом превышение фоновых концентраций в донных отложениях зафиксировано во всех пробах бассейна р. Толыч по Ni, Cu, Zn и Hg, по Cd и Pb в 5 пробах из 6, и As в 4 пробах из 6. Максимальный уровень коэффициента концентрации ($K_c > 136$) был зафиксирован по ртути в точке опробования 4Т в месте слияния р. Толыч и р. Затолыч. За счет процессов разбавления к устью реки коэффициент концентрации снижается до $K_c = 67$, но превышения относительно условного фона зафиксированы по всем исследуемым элементам на этом участке реки.

Рассчитанные значения суммарного показателя загрязнения Z_c свидетельствуют, что уровень техногенного загрязнения донных отложений р. Толыч изменяется от высокого (33% проб) до очень высокого (67% проб) (рисунок 3.4.10). Наибольший уровень загрязнения отмечен в месте слияния р. Толыч и р. Затолыч ($Z_c = 168$), в устье реки уровень снижается до высокого ($Z_c = 92$). При этом необходимо отметить, что очень высокий уровень загрязнения начинается с верховья реки.



Рисунок 3.4.10 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения донных отложений в р. Толыч

В месте слияния р. Толыч и его притока (р. Затолыч) (точка опробования Т4) выявлены максимальные концентрации Zn, Cu, As и Hg. Это может быть обусловлено влиянием неустановленных источников загрязнения выше по течению, влиянием хлорид-ионов на повышенную активность этих элементов на участках между Т2 и Т4, а также Т2 и Т3, поскольку относительно верхних точек опробования (Т2 и Т3) превышение по As составило 3,7 раза, по Zn – 2,4 раза, по Hg – 1,8 раза, по Cu – 1,3 раза.

Высокие концентрации Cd в донных отложениях зафиксированы после сброса сточных вод предприятия химической промышленности. Повышение уровня Pb в донных отложениях может быть связано с диффузным загрязнением от шламонакопителя (рисунок 3.4.11), расположенного выше по течению и влиянием хлорид-ионов на повышенную активность этих элементов.

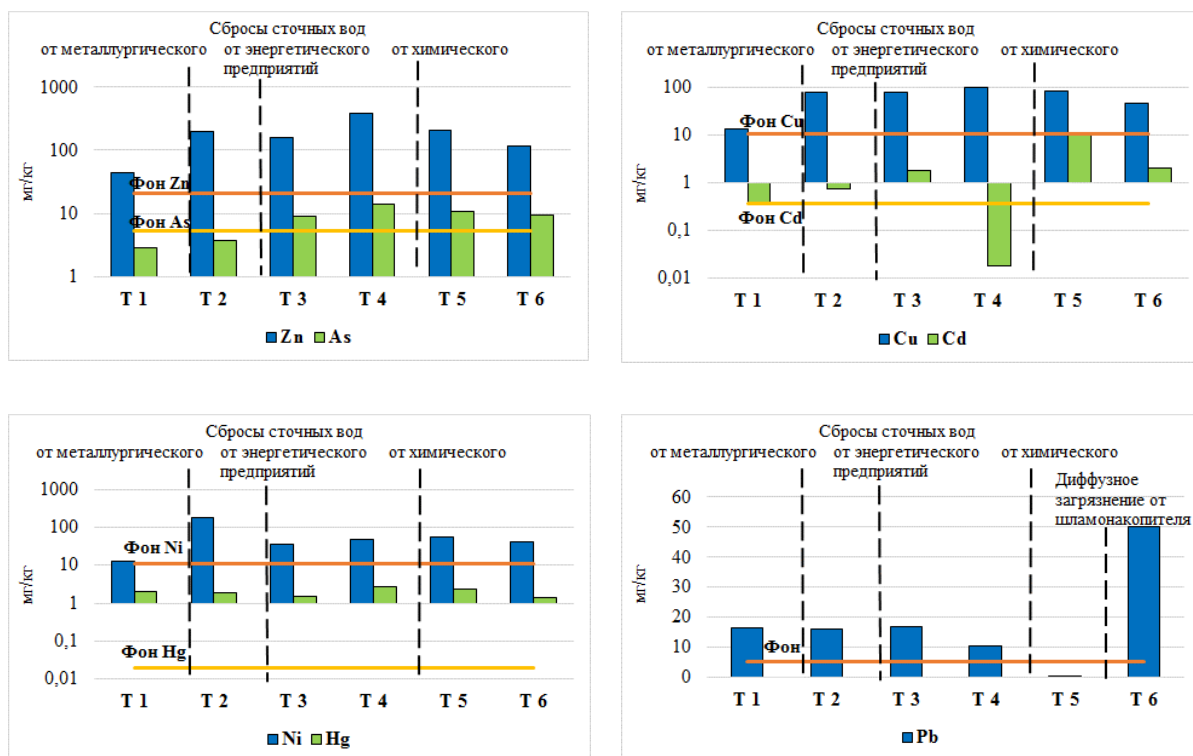


Рисунок 3.4.11 – Распределение микроэлементов в донных отложениях р. Толыч

В бассейне р. Толыч полученные значения индекса потенциального экологического риска RI, рассчитанного с использованием токсикологического коэффициента, продемонстрировали максимальный уровень этого индекса (чрезмерно высокий $RI=2979-5672$) среди исследуемых рек Соликамско-Березниковской агломерации, который наблюдается за счет высоких концентраций в донных отложениях ртути и кадмия. Среднее значение RI в бассейне р. Усолки составляет 4246, что соответствует чрезмерно высокому уровню (пороговое значение $RI \geq 600$).

Анализ риска вредного воздействия микроэлементов в донных отложениях на водные организмы на основе экотоксикологического показателя PECQ в бассейне р. Толыч свидетельствует о различном уровне воздействия от слабого до умеренного. Наименьший уровень воздействия (PECQ=0,37) отмечен в верховье реки (Т1), наибольший уровень (PECQ=0,99) – в точке опробования Т5 на участке после сбросов сточных вод химического предприятия.

Для того, чтобы выявить связь между макро- и микроэлементами в донных отложениях бассейна р. Толыч был проведен корреляционный анализ (таблица 3.4.9). Среди макрокомпонентов выявлена положительная значимая корреляция ($p < 0,05$, $0,88 < r < 0,98$) между Ca^{2+} и SO_4^{2-} , Mg^{2+} и Na^+ , между SO_4^{2-} и Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также Cl^- и Na^+ . Корреляционный анализ между макро-и микроэлементами выявил сильную корреляцию Zn с Mg^{2+} и SO_4^{2-} ($r = 0,84 < r < 0,89$), As с Na^+ ($r = 0,83$), Hg с Mg^{2+} ($r = 0,84$). А также выявлена отрицательная связь между водородным показателем и HCO_3^- ($r = -0,87$). В целом, наличие связей между Hg и Zn с Mg^{2+} ($r = 0,84$) и As с Na^+ ($r = 0,83$) свидетельствует о влиянии засоления на рост концентраций Hg, Zn и As в донных отложениях р. Толыч.

Таблица 3.4.9 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микроэлементами в донных отложениях бассейна р. Толыч ($n = 6$)

	HCO_3^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	pH
HCO_3^-	1,00	0,45	0,65	0,41	0,76	0,40	0,44	0,25	0,65	0,68	0,64	0,60	0,60	-0,30	-0,87
Ca^{2+}		1,00	0,88	0,95	0,27	0,65	0,96	-0,23	0,45	0,80	0,70	-0,25	0,70	-0,11	-0,19
Na^+			1,00	0,73	0,46	0,88	0,77	-0,31	0,39	0,67	0,83	0,06	0,53	0,11	-0,45
Mg^{2+}				1,00	0,31	0,41	0,98	-0,17	0,53	0,84	0,61	-0,20	0,84	-0,38	-0,17
K^+					1,00	0,32	0,24	-0,20	0,23	0,31	0,44	0,80	0,66	-0,52	-0,58
Cl^-						1,00	0,44	-0,45	-0,06	0,25	0,58	-0,02	0,18	0,49	-0,19
SO_4^{2-}							1,00	-0,15	0,62	0,89	0,71	-0,21	0,75	-0,29	-0,26
Ni								1,00	0,37	0,23	-0,32	-0,08	0,01	-0,12	-0,22
Cu									1,00	0,88	0,67	0,22	0,48	-0,44	-0,76
Zn										1,00	0,72	0,00	0,73	-0,40	-0,58
As											1,00	0,29	0,40	-0,07	-0,71
Cd												1,00	0,18	-0,41	-0,70
Hg													1,00	-0,72	-0,28
Pb														1,00	0,23
pH															1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

Среди микроэлементов обнаружены значительные положительные корреляции ($r > 0,75$, $p \leq 0,05$) между общим содержанием Zn-Cu со значением коэффициента корреляции 0,88. Несмотря на высокие концентрации Hg в донных отложениях в большинстве малых рек и Cd в

р. Толыч, для этих элементов не были выявлены достоверные статистические корреляции между микроэлементами. Вероятной причиной аккумуляции Cd и Hg в осадках может служить формирование геохимического барьера, где физико-химические процессы определяют форму нахождения ртути и кадмия, их накопление в осадках на участках с низкими скоростями течения реки, что отмечено и в опубликованных работах (Ignatavičius et al., 2022; Nasrabadi et al., 2022).

Согласно коэффициенту донной аккумуляции, отмечены повышенные значения для Pb, Zn, Ga, W, Ba, Cu, Sn, V, свидетельствующие об активном течении процессов аккумуляции этих элементов из воды в донные отложения за счет осаждения, сорбции или хемосорбции, что подтвердилось и очень высоким загрязнением донных отложений по суммарному показателю загрязнения Zc (Ушакова и др., 2021).

Бассейн р. Зырянки

Основным источником загрязнения донных отложений в бассейне р. Зырянки является Cd, значения Igeo для которого изменяются от -2,17 (низкий уровень загрязнения) до 3,86 (высокий уровень загрязнения). На этом объекте от умеренного до высокого уровня загрязнения выявлен локальный участок по Hg. Значительная вариация значений содержаний свидетельствует о разных источниках поступления. По остальным металлам уровень загрязнения не превышает от низкого до умеренного.

Преобладающий уровень загрязнения по суммарному показателю Zc слабый, при использовании показателя RI – умеренный и низкий, что в целом соответствует слабому воздействию (до 86%) на биоту (рисунок 3.4.12). При этом в устье реки уровень загрязнения по RI высокий, по показателю Zc – средний, он обусловлен высокими концентрациями Hg, Cd и Pb.

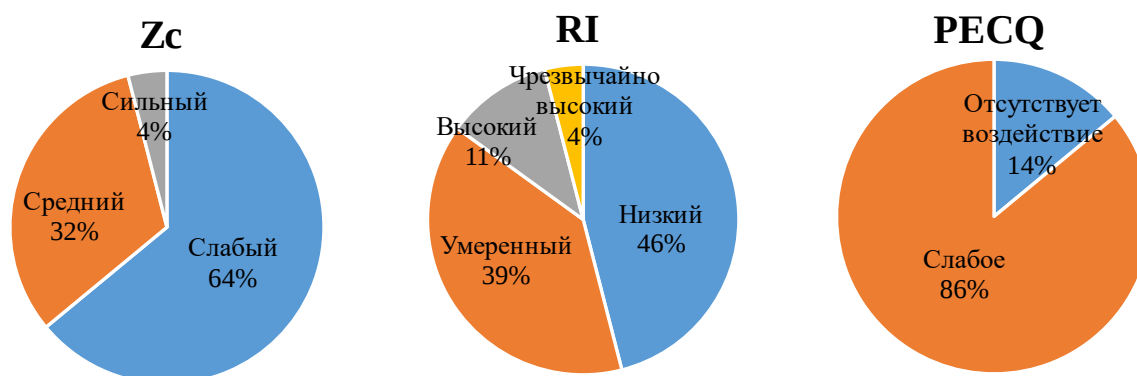


Рисунок 3.4.12 – Соотношение количества проб с различным уровнем загрязнения донных отложений в р. Зырянки по интегральным показателям

В пределах правобережной водосборной площади в районе Верхне-Зырянского водохранилища выявлены участки (4Z и 9Z) с максимальными содержаниями Ni, Cu, Pb и As, где превышения фоновых значений составили 5,0, 4,6, 3,8 и 2,1 раза, соответственно. Это позволяет сделать вывод о повышенном природном геохимическом фоне для донных отложений по этим элементам для данного бассейна (рисунок 3.4.13). Так, например, на участке от 1Z до 23Z отмечено повсеместное превышение по Ni относительно фона – до 5 раз. На участке между Верхне- и Нижне-Зырянскими водохранилищами зафиксировано высокое содержание по Cd и Zn в отложениях, превышающее условно фоновые значения в 5,6 и 3,3 раза, соответственно.

Распределение Zn в отложениях на участке от 9Z-23Z в пределах бассейна р. Зырянки имеет локальный характер, свидетельствующий о природном геохимическом фоне в сочетании с родниковой разгрузкой минерализованных вод (до 7 г/л) хлоридно-натриевого состава на участке от 21Z-23Z, где содержание цинка достигают 25,7 мкг/дм³. В целом превышение по Cd в донных отложениях в бассейне р. Зырянки носит локальный характер, отмечается только в точках опробования 20Z, 11Z, 28Z, и 22Z.

Медианное превышение по Hg в бассейне р. Зырянки составило 1,5 раза, что незначительно превышает фоновые значения. Наибольшее превышение относительно фона в 32,5 раза зафиксировано в правобережном притоке р. Быгель, после пересечения реки селитебной территории г. Березники, имея аномалию локального характера.

По данным корреляционного анализа (таблица 3.4.10) выявлена сильная ($p < 0,05$) корреляция между Cu-Ni ($r = 0,77$) и Ni-Pb ($r = 0,76$), умеренная корреляция между Cu-Pb ($r = 0,68$). При этом несмотря на высокие концентрации Cd и Hg, для этих элементов не были выявлены достоверные статистические корреляции, что свидетельствует о разных источниках поступления в отложения. Вероятной причиной аккумуляции Cd и Hg в осадках может служить формирование геохимического барьера, где различные физико-химические процессы влияют на форму нахождения ртути и кадмия, связанную с типом движения осадка и скоростью потока (Ignatavičius et al., 2022; Nasrabadi et al., 2022).

По ранее проведенным исследованиям, наиболее соленые воды находятся в районе водосброса в Нижне-Зырянском водохранилище, где минерализация вод достигает 1,9 г/л с наибольшим уровнем загрязнения донных отложений по Zс, за счет высоких концентраций Zn, Со и Ni (Максимович и др., 2012). Исследованиями было установлено, что отложения водохранилища в микроэлементном отношении имеют геохимическое сходство с почвами, и наибольшая аккумуляция выявлена для Ni, что свидетельствует о едином источнике поступления скорее всего связанным с поверхностным стоком с городской территории г. Березники (Ворончихина и др., 2013).

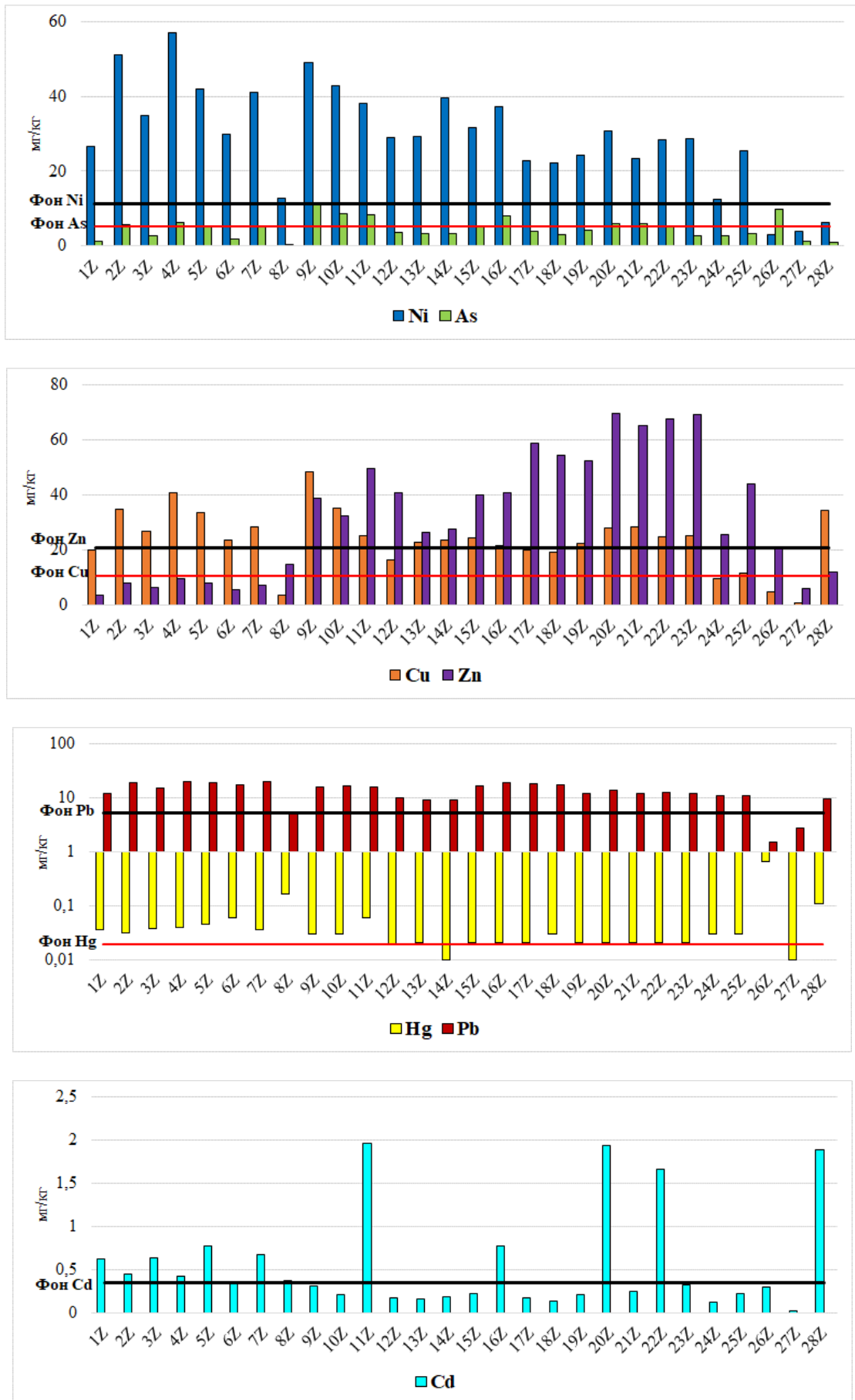


Рисунок 3.4.13 – Распределение микроэлементов в донных отложениях р. Зырянки

При этом качество донных отложений характеризуется разным уровнем загрязнения на разных участках водохранилища. Здесь выделены четыре зоны экологической опасности, где около 120 тыс. м³ донных отложений согласно критериям использования грунтов в соответствии с нормативными документами подлежат вывозу и утилизации на спецполигонах или захоронению после обязательной дезинфекции (Максимович и др., 2008).

Таблица 3.4.10 – Матрица коэффициентов парной корреляции ($p < 0,05$) между макро- и микроэлементами в донных отложениях бассейна р. Зырянки ($n=28$)

	pH	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
pH	1,00	0,18	0,37	-0,16	0,17	0,01	0,24	0,19
Ni		1,00	0,77	-0,04	0,46	0,05	-0,44	0,76
Cu			1,00	0,04	0,44	0,29	-0,36	0,68
Zn				1,00	0,26	0,17	-0,19	0,06
As					1,00	0,12	0,27	0,29
Cd						1,00	-0,01	0,13
Hg							1,00	-0,50
Pb								1,00

Примечание: красный цвет – значимые корреляционные связи

В целом, с учетом различных природных и техногенных факторов в пределах исследуемых водосборных бассейнов (таблица 3.4.11), максимальное содержание микроэлементов в системе «вода↔донные отложения» отражают сложное взаимодействие гидрологических, техногенных, физико-химических факторов в водотоках, которые определяют изменение миграционной способности этих элементов и иммобилизацию в составе донных отложений, что отмечается и другими исследованиями, в частности В.С. Валиевым и соавторами (2019).

На территории исследования в бассейне р. Усолки в речных водах и донных отложениях выявлены максимальные концентрации в верхнем течении (точки опробования 4US и 6US) по Cd, в нижнем течении (23US и 25US) по Ni (таблица 3.4.12). Высокие концентрации Cd в верхнем течении носит локальный характер, они соответствуют природному геохимическому фону и не связаны с воздействием разработки ВКМКС, поскольку руды и отходы калийной промышленности обеднены Cd, что подтверждается исследованиями Б.А. Бачурина (2006), а также низкими концентрациями в родниковой разгрузке этого элемента в бассейне р. Усолки по данным П.А. Белкина (2019).

Высокие концентрации Ni в нижнем течении р. Усолки могут быть связаны с поступлением высокоминерализованных вод (1-15 л/с) родников и рассолов из старых рассолоподъемных скважин на этом участке реки по обоим берегам, в составе вод которых были

зафиксированы повышенные содержания Ni. Источником поступления этого элемента следует рассматривать и поверхностный сток с городской территории (таблица 3.4.12).

Таблица 3.4.11 – Элементный состав источников загрязнения на территории исследования

Источник	Объект	Элемент
Хайрулина и др., 2023; Чайковский и др., 2019	Старые рассолоподъемные скважины	Cl ⁻ – Co, Ni, Cu, As, V, Ti
Белкин, 2019	Родниковая разгрузка из ТКТ (фоновый участок)	Cu, As
Белкин, 2019	Родниковая разгрузка из ТКТ вблизи складирования отходов калийной промышленности	Cl ⁻ – Co, As, V, Ni, Sb
Данные исследования	Родниковая (рассолоподъемная) разгрузка в нижнем течении р. Усолки	Cl ⁻ – V, Ti, As, Zn, Cu, Ni
Калинина и др., 2016	Терригенно-карбонатных пород соликамских отложений	Ti, Sr, Mn, Ba, V, Ni, Cr, Zr, Rb, Cu, Zn
Данные исследования	Родниковая разгрузка на участке между Верхне- и Нижне-Зырянским водохранилищами	Zn, As, Ni, Cr

В бассейне реки Чёрной максимальные концентрации Ni, Cu и As зафиксированы в нижнем течении (точки опробования 9CH и 10CH) перед впадением в Камское водохранилище после сбросов сточных вод, что связано с техногенным фактором.

Таблица 3.4.12 – Сравнительная оценка максимальных содержаний в точках опробования исследуемых малых рек

Река	Компонент	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Усолка	Речные воды	23US	22US	25US	25US	4US	14US
	Донные отложения	25US	8US	8US	18US	6US	24US
Чёрная	Речные воды	10CH	10CH	10CH	10CH	8CH	8CH
	Донные отложения	10CH	9CH	4CH	10CH	5CH	1CH
Толыч	Речные воды	6T	2T	1T	1T	—*	5T
	Донные отложения	2T	4T	4T	4T	5T	6T
Зырянка	Речные воды	20Z	5Z	19Z	20Z	—	10Z
	Донные отложения	4Z	9Z	23Z	9Z	20Z	4Z

Примечание: * - во всех исследованных пробах речных вод р. Толыч и р. Зырянка значения Cd находятся ниже предела обнаружения.

В нижнем течении р. Толыч (точки опробования Т5 и Т6) в водах и донных отложениях были зафиксированы максимальные концентрации Pb. Рост концентраций этого элемента после сбросов сточных вод связан с воздействием задекларированного источника загрязнения, воды которого поступают на участке перед точкой опробования Т5. Это подтверждено данными исследованиями. Так, содержание Pb в сточных водах на момент единовременного опробования бассейна р. Толыч в 2021 г. составило 0,39 мкг/дм³. Кроме того, по данным А.В. Шиловой и др. (2020) в элементном составе образцов старого содового озера и шламохранилища, содержание Pb в кислоторастворимой форме достигало 60,5 мг/кг, в подвижной форме – 29,6 мг/кг, что позволяет рассматривать действующий шламонакопитель, расположенный в нижнем течении, источником диффузного загрязнения р. Толыч на этом участке.

В бассейне р. Зырянки в левобережных притоках (5Z и 9Z), протекающих в естественных условиях без техногенного воздействия, максимальные концентрации Cu в речных водах и донных отложениях отражают природный геохимический фон территории исследования.

3.5 Анализ специфики техногенеза в бассейне малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

3.5.1 Геохимические характеристики поверхностных вод и донных отложений малых рек

Результаты расчета интенсивности водной миграции K_x свидетельствуют, что в водах р. Усолки и ее притоков сильная миграция характерна для элементов-комплексобразователей Cd, Cu, Pb и анионогенного As, средней миграция – для элемента-комплексобразователя Ni и анионогенного Cr. Как правило, техногенное воздействие усиливает водную миграцию элементов, не исключением является бассейн р. Чёрной, где наблюдаются одни из самых наибольших коэффициентов водной миграции. Так, сильная миграция установлена для анионогенного As ($K_x=3$) и элементов-комплексобразователей Zn ($K_x=3$), Cu ($K_x=1,7$), Cd ($K_x=1,5$), средняя миграция – для элементов-комплексобразователей Ni, Pb и анионогенного Cr (таблица 3.5.1).

В бассейне р. Толыч только элементы-комплексобразователи Cd ($K_x=1,7$) и Cu ($K_x=1,0$) характеризуются сильной миграцией, остальные, как правило, средней, за исключением анионогенного Cr, который характеризуется слабой и очень слабой миграцией. В бассейне р. Зырянки сильная водная миграция выявлена только для Pb ($K_x=5$) и Cd ($K_d=2,5$), для остальных элементов, за исключением анионогенного As – средняя.

Таблица 3.5.1 – Ряды миграции элементов в водах исследуемых малых рек

Реки	Интенсивность миграции			
	Очень сильная ($K_x = n \cdot 10 - n \cdot 100$)	Сильная ($K_x = n$)	Средняя ($K_x = n \cdot 10^{-1}$)	Слабая очень слабая ($K_x < n \cdot 10^{-1}$)
Усолка	–	Cd, Cu, Pb, As	Ni, Cr	–
Чёрная	–	As Zn, Cu, Cd	Cr, Pb, Ni	–
Толыч	–	Cd, Cu	Ni, Zn, As, Pb	Cr
Зырянка	–	Pb, Cd	Cu, Zn Ni, Cr	As

Специфика условий каждого водосборного бассейна – геологических, геоморфологических, гидрологических и техногенных факторов, сформировала свои характерные корреляционные зависимости как для поверхностных вод, так и для донных отложений в исследуемых реках. Анализ корреляционных зависимостей (таблица 3.3.3-3.3.6) между основными ионами поверхностных вод в исследуемых реках выявил, что играющую роль в формировании их химического состава играют ионы Cl^- , Ca^{2+} и Na^+ , которые в свою очередь влияют на повышение уровня минерализации вод. Так, например, в бассейнах рек Чёрная, Толыч и Зырянка выявлена прямая зависимость между ростом минерализации и концентрациями микроэлементов (таблица 3.5.2).

Анализ корреляционных зависимостей между исследованными микроэлементами позволил выявить тесные взаимосвязи в поверхностных водах и донных отложениях каждого исследуемого бассейна, отражая его геохимическую специфику.

Известно, что интенсивность миграции Zn, Cu, Ni, As относится к сильной и средней степени и зависит от многих факторов (химические связи и свойства самих элементов, степень выветривания пород) (Чертко и др., 2007). В ходе корреляционного анализа указанные элементы с сильной миграционной способностью имели статистически значимые положительные корреляции в поверхностных водах и донных отложениях ($p < 0,05$, $r > 0,75$). Так в бассейне р. Усолки статистически достоверная положительная корреляция выявлена для Zn-Ni в речных водах и Zn-Cu в донных отложениях, которая преимущественно связана с природными факторами – родниковой разгрузкой из пород верхнесоликамской подсвиты (Белкин, 2019; Калинина и др., 2016).

В р. Чёрной и р. Зырянке выявлена прямая зависимость роста концентраций As, Cr и Ni с общей минерализацией вод. Рост концентраций макро- и микрокомпонентов в р. Чёрной связан со сбросами сточных вод (Ni и Cu входят в перечень загрязняющих веществ сточных вод). Минерализация вод этой реки в нижнем течении достигала до 15 г/л. Рост содержаний, исследованных макро- и микрокомпонентов в р. Зырянке связан с разгрузкой береговой зоне реки соленых родников, которые формируются за счет поступления подземных вод из соляно-

мергельной толщ (нижнесоликамская подсвита (P_{1sl_2})), терригенно-карбонатной толщ (верхнесоликамская подсвита (P_{1sl_1})) (Максимович и др., 2012).

Таблица 3.5.2 – Сопоставление результатов корреляционного анализа содержания микроэлементов в поверхностных водах и донных отложениях малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Показатель	р. Усолка	р. Чёрная	р. Толыч	р. Зырянка
Коэффициент корреляции высокий ($r > 0,75$)	Zn-Ni Zn-Cu	Cd-Ni-Cu-Zn Cr-As, Pb-Cu Zn-Cd Ni-Cu-As	Cu-Ni	Cr-Ni-As As-Cu Ni-Cu-Pb
Коэффициент корреляции умеренный ($r = 0,75 - 0,50$)	Ni-As-Cr As-Zn As-Hg	As-Cu	As-Zn Cu-Pb As-Cu, As-Ni	Pb-Cu
Характерные элементы превышающие фон >2 раза	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Hg	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Hg	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Hg
Прямая зависимость от роста минерализации ($r > 0,75$)		As, Cr, Ni	As	As, Cr, Ni
Прямая зависимость от pH ($r > 0,75$)	Cd		Cr	
Элементы – индикаторы, рекомендуемые для контроля	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg	Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Hg		

Примечание: голубой цвет – поверхностные воды; черный цвет – донные отложения; зеленый цвет – элементы совпадают для поверхностных и донных отложений

Иерархический кластерный анализ по методу Уорда с применением евклидова расстояния для рассчитанных экологических индексов для всех исследуемых бассейнов малых рек демонстрируют три кластера: кластер 1 – ИЗВ-HEI-PECQ-Zc; кластер 2 – ERI; кластер 3 – RI (рисунок 3.5.1). В кластере 1 экологические индексы характеризуются сильной статистической связью, поскольку данные индексы обладают схожими подходами для оценки уровня загрязнения в этих бассейнах. Статически высокие расстояния между остальными кластерами свидетельствует о значительных различиях в экологических индексах, отражающих их индивидуальность для каждого компонента (ERI для поверхностных вод и RI для донных отложений) и основанных на коэффициенте токсичности.

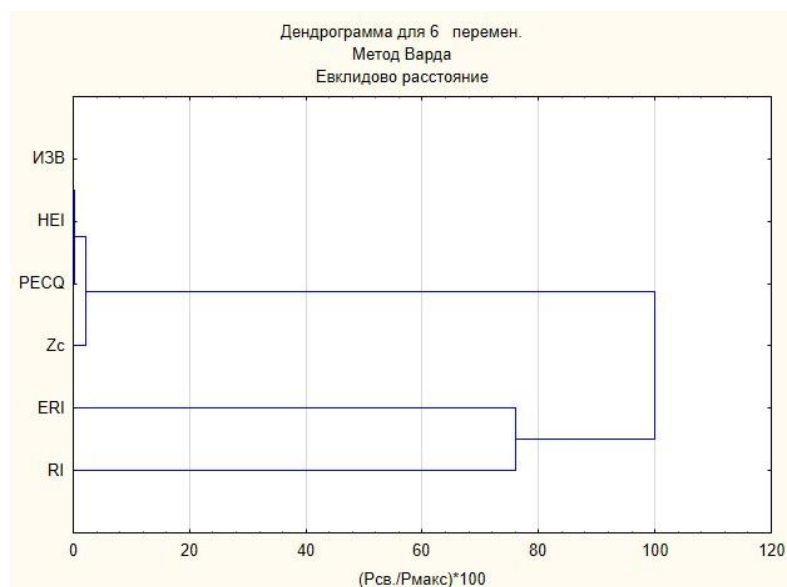


Рисунок 3.5.1 – Дендрограмма результатов кластерного анализа экологических индексов загрязнения исследуемых бассейнов малых рек

Результаты расчетов индексов, основанных на использовании разных подходов (геохимический, санитарно-гигиенический и экотоксикологический) и апробированных в данной работе, охарактеризовать уровень загрязнения микроэлементами водных объектов в условиях повышенного техногенного воздействия в Соликамско-Березниковской агломерации. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о необходимости проведения оценки качества вод таких территорий с использованием фоновых значений, основанных на достаточной выборке значений, а эталонные значения в качестве базы сравнения следует использовать с осторожностью с учетом изменчивости глобальных данных, что также отмечается исследователями (Касимов и др. 2016; Birch et al., 2023). Приводимые фоновые концентрации микроэлементов в речных водах и донных отложениях целесообразно использовать при дальнейших мониторинговых эколого-геохимических исследованиях водотоков на территории Соликамско-Березниковской агломерации.

Как и при оценке поверхностных вод, уровень загрязнения донных отложений следует оценивать на основании геохимических и экотоксикологических подходов. Результаты оценки уровня загрязнения донных отложений свидетельствуют, что осадки в исследуемых малых реках содержат значительное количество загрязняющих веществ, подтвержденное индивидуальными индексами загрязнения (I_{geo} , K_s), комплексными индексами загрязнения (Z_c , RI , $PECQ$). Апробированные индексы для оценки загрязнения микроэлементами донных отложений являются наиболее часто используемыми в исследовательской практике, что демонстрируется в рецензируемых работах, где многие авторы отмечают важность оценки донных отложений при

комплексных экологических исследованиях водных объектов в сочетании с другими инструментами скрининга (Jahan et al., 2018; Nawrot et al., 2021).

На сегодняшний день существует более 30 интегральных показателей загрязнения микроэлементами речных вод и донных отложений, которые являются частью комплексной оценки экологического состояния водного объекта. При этом эффективность применения индексов загрязнения зависит от качественного проботбора, размера зерна для донных отложений, периодичности отбора, применяемых аналитических методов, включая пробоподготовку, которые исследователь должен учитывать при организации мониторинга водных объектов (Ferreira et al., 2022).

Необходимо отметить, что оценка качества поверхностных вод, выполненная с использованием рыбохозяйственных или санитарно-гигиенических нормативов, не всегда достоверно отражает негативный эффект воздействия, поскольку эти единые нормативы используются на всей огромной территории России с ее различными физико-географическими, климатическими и социально-экономическими условиями, не учитывает естественные природные факторы, характерные для конкретного региона и водосборного бассейна (Веницианов и др., 2018). Это ставит задачу необходимости оценки качества водных объектов с использованием региональных фоновых значений и установления региональных показателей качества воды (ПДКрег), особенно по содержанию железа (общего), марганца, меди и цинка для р. Камы в пределах Соликамско-Березниковской агломерации, которые характерны для данной территории на протяжении ряда лет (Веницианов и др., 2015).

3.5.2 Характеристика эколого-геохимического состояния устьевой части малых рек

В донных отложениях в р. Толыч, несмотря на высокие концентрации Cd и Hg, не выявлены достоверные связи с другими исследованными элементами. Известно, что даже при небольшой концентрации галогенов в Cl-средах ртуть активно ассоциирует с геохимически связанными Cd и Zn (Иванов, 1997). Разные уровни геохимических аномалий в нижнем течении исследованных рек связаны с поступлением веществ как от природных, так и техногенных источников, которые определяются функционированием водосборов как геосистем. Геохимические ассоциации значительно отличаются между речными водами и донными отложениями исследованных объектов (таблица 3.5.3).

Состав вод в устьевой части малых рек является индикатором эколого-геохимической обстановки на их водосборной площади, эти воды формируют состав вод акватории Камского водохранилища. На рисунке 3.5.2 представлены обобщенные данные по степени загрязнения

поверхностных вод и донных отложений исследуемых объектов с применением различных интегральных индексов.

Таблица 3.5.3 – Геохимические ассоциации в речных водах и донных отложениях в нижнем течении малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Река	Порядок значений Кс химических элементов			
	100-30	30-10	10-3	3-1,5
Усолка	Pb	Hg	Cu-As / Ni	Ni-Zn / Zn-Cu-Pb
Чёрная	As-Cr	Ni	Cu-Zn	–
Толыч	Hg	–	Pb-Zn-Cd-Cu-Ni/Ni	As
Зырянка	–	Cu-Ni	As / Hg-Cd	Cr / Pb

Примечание: голубой цвет – поверхностные воды; черный цвет – донные отложения; зеленый цвет – элементы совпадают для поверхностных и донных отложений; прочерк – показатель в данной градации отсутствует

В целом, наихудшее качество поверхностных вод среди исследованных объектов выявлено в р. Чёрной, а наихудшее качество донных отложений – в р. Толыч. Наиболее напряженная экологическая ситуация отмечена в устьевой части р. Чёрной, о чем свидетельствуют высокие значения ИЗВ, ERI, HEI для вод, а также Zc, PECQ для донных отложений. Качество донных отложений в устьевой части рек Усолки и Толыч свидетельствуют о накоплении в них большого количества микроэлементов, потенциально опасных для гидробионтов в период захода на эти участки рыбы в весенний период для нереста, летне-осенний – для нагула.

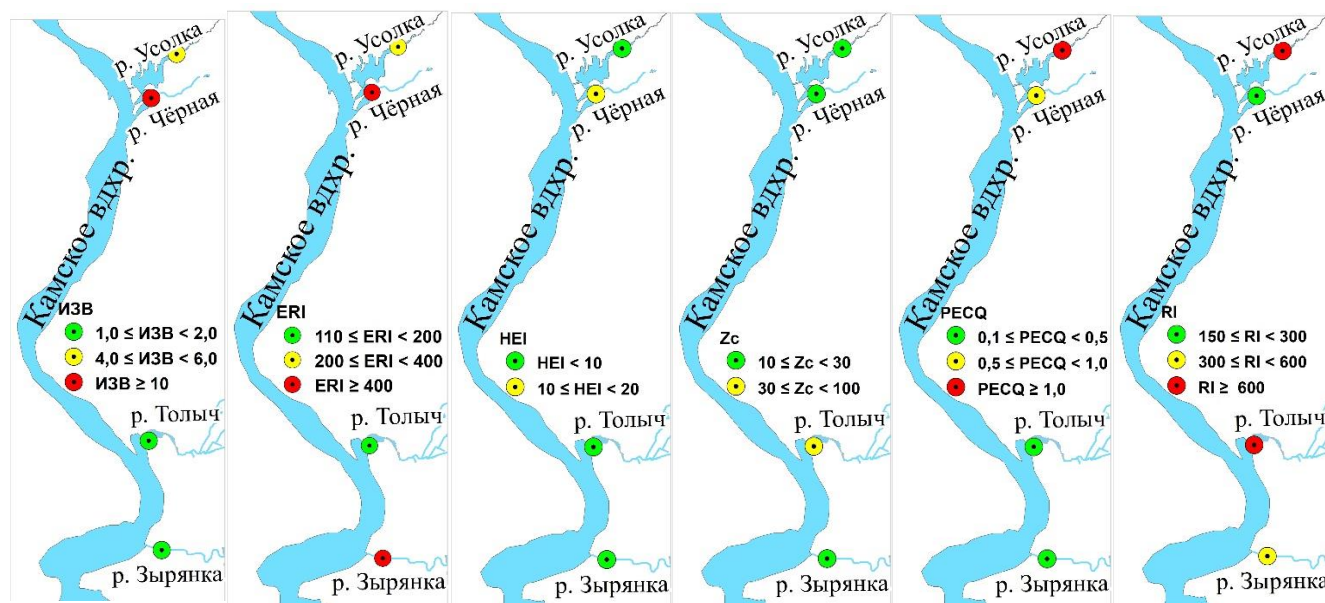


Рисунок 3.5.2 – Эколого-геохимическая оценка устьевых участков малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

Бассейн р. Усолки характеризуется наименьшим уровнем техногенного воздействия в пределах водосборной площади в сравнении с другими исследуемыми малыми реками. Однако

на этом объекте отмечен высокий уровень загрязнения микроэлементами в нижнем течении, который связан преимущественно с разгрузкой высокоминерализованных вод из старых рассолоподъемных скважин, родниковой разгрузкой и поверхностным стоком с городской территории, что подтверждается высокими концентрациями исследованных микроэлементов и уровнем минерализации вод до 1,3 г/л с хлоридно-натриевым составом.

Ранее проведенными исследованиями установлено, что воды в р. Усолке как и в р. Каме характеризуются повышенным содержанием железа (общего), марганца, меди и цинка, что связано с естественной региональной геохимической особенностью территории (Щукова и др., 2019; Веницианов и др., 2015; Мирошниченко, 2011). Результаты данного исследования в бассейне этой реки также выявили до 84% проб с превышением ПДК по меди в этих водах. При этом в нижней части р. Усолки за 3,8 км до впадения в Камское водохранилище, кроме превышений по Cu в воде относительно нормативов рыбохозяйственного значения, выявлены превышения по Zn и Ni. Необходимо отметить, что не зафиксирована интенсивная аккумуляция загрязняющих веществ в донных отложениях бассейна р. Усолки в отличие от других исследованных малых реках, что связано с соотношением уровня техногенного воздействия и значительной водосборной площади этого объекта.

Бассейн р. Чёрной

Наиболее сложная водохозяйственная и напряженная экологическая обстановка наблюдается в бассейне р. Чёрной и р. Толыч. В настоящее время нижнее течение р. Чёрной разделено на две части: старое русло, по которому до 2017 г. происходил сброс сточных вод и в устье сформировалась значительная толща техногенных осадков, представляющих угрозу вторичного загрязнения акватории Камского водохранилища, а также современное русло, представленное искусственным каналом по транспортировке сточных вод и стока реки из верхнего течения, которые поступают в Камское водохранилище через очистные сооружения механической очистки.

Экологическая ситуация в устье р. Чёрной имеет ряд экологических проблем, связанных с аккумуляцией здесь большой толщи тонкодисперсных аллювиальных отложений (с высоким содержанием Sr, Ni, Co, Mn, Mo, Se, V, Li) (Меньшикова, 2022). По данным космоснимков (Google) в меженьный период 2006 г. виден белый шлейф от сбросов сточных вод в устьевой части реки, что также отчетливо наблюдается и на снимках 2008 г. (рисунок 3.5.3). На зимнем снимке 2013 г., также отчетливо виден незамерзающий техногенный сток реки, который поступает в водохранилище. В период высокой воды (снимок 2020 г.) отложения в заливе р. Чёрной являются долговременным источником первичного и вторичного загрязнения вод Камского водохранилища ввиду их размыва, несмотря на то, что с 2017 г. в среднем течении р. Чёрной

организован канал транспортировки сточных вод со сбросом в Камское водохранилище через очистные сооружения механической очистки.

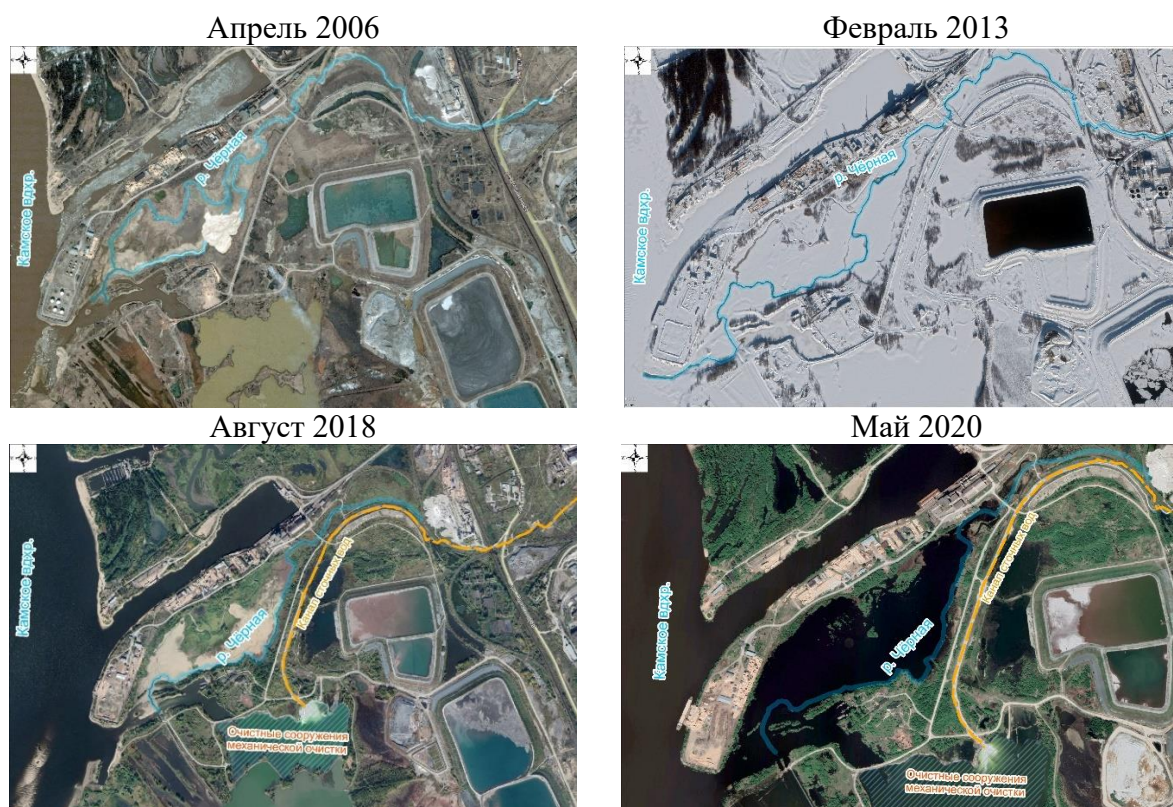


Рисунок 3.5.3 – Устье р. Чёрной (изображение GoogleEarth)

Бассейн р. Толыч

Современная территория промзоны г. Березники претерпела значительные планировочные мероприятия до наполнения Камского водохранилища в 1953 г. В рамках защитных мероприятий при строительстве Камской ГЭС была возведена ограждающая дамба от затопления территории для сохранения существовавших промышленных предприятий. В результате этого был выполнен перенос русел рек Толыч и Зырянки в нижнем течении (Ушакова и др., 2023). На рисунке 3.5.4 представлена структура гидросети этих рек до и после заполнения Камского водохранилища. Современное устье р. Толыч перенесено от своего естественного положения на 2,5 км выше по берегу Камского водохранилища, а устье р. Зырянки – на 1 км вниз. Переброска рек в совершенно новое русло (даже их частей) и наличие водопропускных сооружений сопровождается изменением гидрологических условий, таких как ускоренная эрозия и осадконакопление, изменение скорости потока или водопропускной способности русла, нарушение режима стоков наносов в устье, которые как правило приводят к заилению русла, что создает проблемы с качеством вод и другие экологические последствия (Flatley et al., 2018). Таким образом, помимо повышенного техногенного воздействия от точечных и диффузных источников загрязнения в бассейне р. Толыч, которые негативно влияют на

качество вод, немаловажным фактором ухудшения экологического состояние этого объекта является гидроморфологическое изменение русла на водосборной территории.

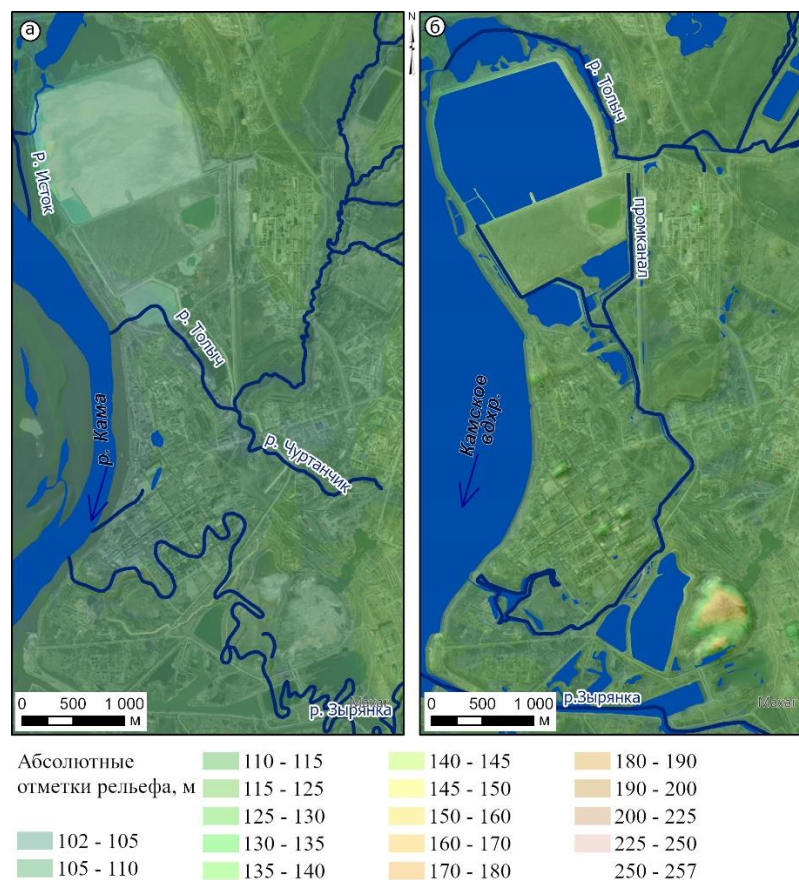


Рисунок 3.5.4 – Структура гидросети Толыча и Зырянки до (а) и после (б) наполнения Камского водохранилища

Бассейн р. Зырянки

В настоящее время на этом объекте не осуществляется вынос загрязняющих веществ из Верхне-Зырянского водохранилища, поскольку существующая конструкция плотины ограничивает транспорт осадков вниз по течению. Таким образом, отсутствует возможность активной миграции высокоминерализованных вод, сконцентрированных в придонных слоях обширной области минерализации, которые также содержат значительное количество загрязняющих веществ, сорбированных в осадках за весь период эксплуатации водохранилища (Любимова и др., 2023). Создание техногенных механических барьеров в виде плотин как на р. Зырянке, так и в верховье р. Чёрной, препятствует механической миграции вещества в водных потоках, здесь могут формироваться различные физико-химические барьеры, на которых происходит процесс накопления Cu, Zn, Ni (например, на щелочном геохимическом барьере) (Блинов, 2000).

Современная экологическая и водохозяйственная ситуация Нижне-Зырянского водохранилища характеризуется зарастанием осушенной части водохранилища, в связи с

понижением нормального подпорного уровня после аварии на Первом Березниковском рудоуправлении, поскольку процесс оседания земной поверхности стал некомпенсируемым горными мероприятиями. Высокий уровень химического и микробиологического загрязнения в Нижне-Зырянском водохранилище требует выполнения природоохранных мероприятий по стабилизации сложившейся экологической ситуации (Максимович и др., 2021; Максимович и др., 2008).

Камское водохранилище

Загрязнение р. Камы ниже г. Березников, связанное с увеличением минерализации вод до 1,2 г/л с хлоридной гидрохимической формацией, отмечалось еще в конце прошлого столетия, где основными источниками загрязнения были воды рек Толыч и Зырянка. Так, например, высокое содержание хлорид-ионов в р. Зырянке в 80-х годах прошлого века было связано с прямым сбросом рассолов (до 90 г/л) из шламохранилищ Первого Березниковского калийного рудоуправления, когда минерализация воды в реке достигала 4-5 г/л (Бельтюков, 2000). После аварийного затопления и закрытия рудника в 2006 г. прямой сброс рассолов прекратился в р. Зырянку. В настоящее время воды р. Зырянки пресные, однако наличие Cl-Na фации в устьевой части реки свидетельствуют о диффузном поступлении рассолов, которые являются источниками поступления микроэлементов в акваторию р. Зырянки.

Анализ сравнения содержания хлоридов в Камском водохранилище в конце 90-х годов прошлого века и результатов настоящего исследования свидетельствуют, что содержание хлорид-ионов значительно ниже, чем в настоящее время. На рисунке 3.5.5 представлено пространственное распределение хлорид-ионов в период 1990-2000 г.г. по данным Г.В. Бельтюкова (2000) и в период 2012-2022 гг. по результатам настоящих исследований, включая информацию по р. Чёрной.

В черте г. Березники у левого берега Камского водохранилища формируется локальная зона загрязнения с вертикальной неоднородностью как по акватории, так и по глубине. Наиболее высокие уровни загрязнения наблюдаются в придонной области у левого берега водохранилища с минерализацией вод до 7 г/л, когда общая минерализация в приповерхностном слое воды здесь от 3 до 10 раз меньше (Возняк и др., 2019).

Ранее в исследовании отмечали, что загрязнение Камского водохранилища происходит на этом участке в результате 4 факторов: фильтрационные разгрузки из действующих шламохранилищ и породных отвалов; естественные выходы высокоминерализованных рассолов; несанкционированные сбросы сточных вод; некорректность устанавливаемых норм сброса (Лепихин и др., 2020). Однако немаловажным фактором загрязнения акватории Камского водохранилища являются поступление рассолов из старых рассолоподъёмных скважин. Основные участки многочисленных старых солевых и промыслов (Ленвенского – 38 скважин

глубиной до 200 м; Дедюхинского – 14 скважин до 189 м; Зырянского – 23 скважины; Березниковского – 30 скважин до 267 м) в настоящее время затоплены водами Камского водохранилища, в результате чего возможно поступление рассолов в Камское водохранилище в черте г. Березники (Максимович, 1969). Это подтверждают работы 1969 г. по обследованию старых рассолоподъёмных скважин, находящихся в зоне подпора Камского водохранилища, где были зафиксированы восходящие потоки рассолов из изливающих скважин.

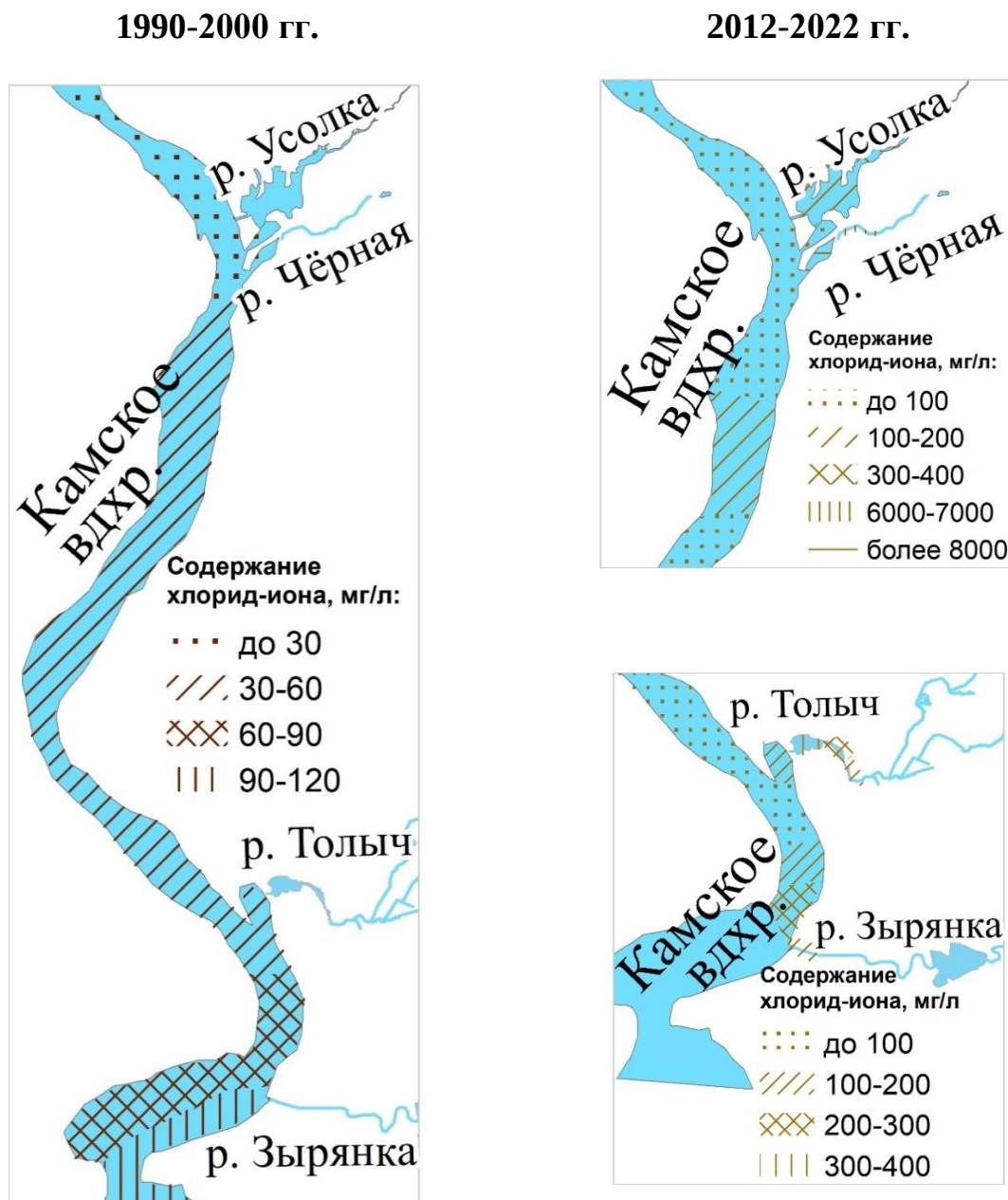


Рисунок 3.5.5 – Пространственное распределение хлорид-ионов в Камском водохранилище на участке от г. Соликамска до г. Березники

В целом высокое содержание хлорид-ионов, Fe, Mn и Cu в водах Камского водохранилища уже длительное время является проблемой технического водоснабжения крупных

промышленных комплексов Соликамско-Березниковской агломерации, т.к. вода на этом участке водохранилища не соответствует нормативам качества даже при условии ее забора из поверхностных горизонтов (Ушакова и др., 2023). Присутствие высоких концентраций хлоридов и микроэлементов в воде при ее заборе могут быть причиной внеплановой остановки производства, поскольку технологические процессы на предприятиях чувствительны к содержанию хлоридов, а также увеличения загрязняющих веществ при сбросе сточных вод предприятий, оплачиваемых водопользователями (Лепихин и др., 2021).

Таким образом, формирование химического состава поверхностных вод и донных отложений исследуемых рек связано с точечными и диффузными источниками загрязнения природного и техногенного генезиса. Высокий уровень загрязнения поверхностных вод и донных отложений малых рек на территории Соликамско-Березниковской агломерации выявлен в первую очередь в бассейнах рек с малой водосборной площадью с существенной долей (до 75% территории) промышленных зон и городской застройки.

Наиболее репрезентативными участками для оценки экологического состояния бассейнов малых рек является их устьевая часть перед впадением в Камское водохранилище. Низкие концентрации микроэлементов в речных водах могут свидетельствовать о временном «самоочищении» водной массы путем осаждения, сорбции или хемосорбции этих элементов в современных аллювиальных отложениях рек, о чем свидетельствует высокий уровень загрязнения донных отложений р. Толыч. Высокие концентрации элементов в донных отложениях р. Толыч (Hg, Zn, Cd, Cu, Pb, As) и р. Чёрной (Ni) представляют потенциальную опасность первичного и вторичного загрязнения речных вод, биоаккумуляции этих элементов бентосными макробеспозвоночными и ихтиофауной.

ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ СБРОСА СТОЧНЫХ ВОД

4.1 Характеристика бассейна р. Толыч

В настоящей главе приведена комплексно-индикаторная геоэкологическая оценка состояния водного объекта, находящегося в условиях длительного сброса сточных вод в среднем и нижнем течении. В качестве модельного объекта для экологической оценки взят бассейн реки Толыч, расположенный на территории г. Березники (рисунок 4.1.1). Комплексно-индикаторная геоэкологическая оценка бассейна р. Толыч выполнена по результатам опробования в конце летнего меженного периода 2021 г. Исследования включали определение физико-химических параметров поверхностных вод и донных отложений (абиотические исследования), изучение ихтиофауны, зообентоса и биотестирование донных отложений с использованием люминесцентных бактерий и *Daphnia magna* Straus (биотические исследования).

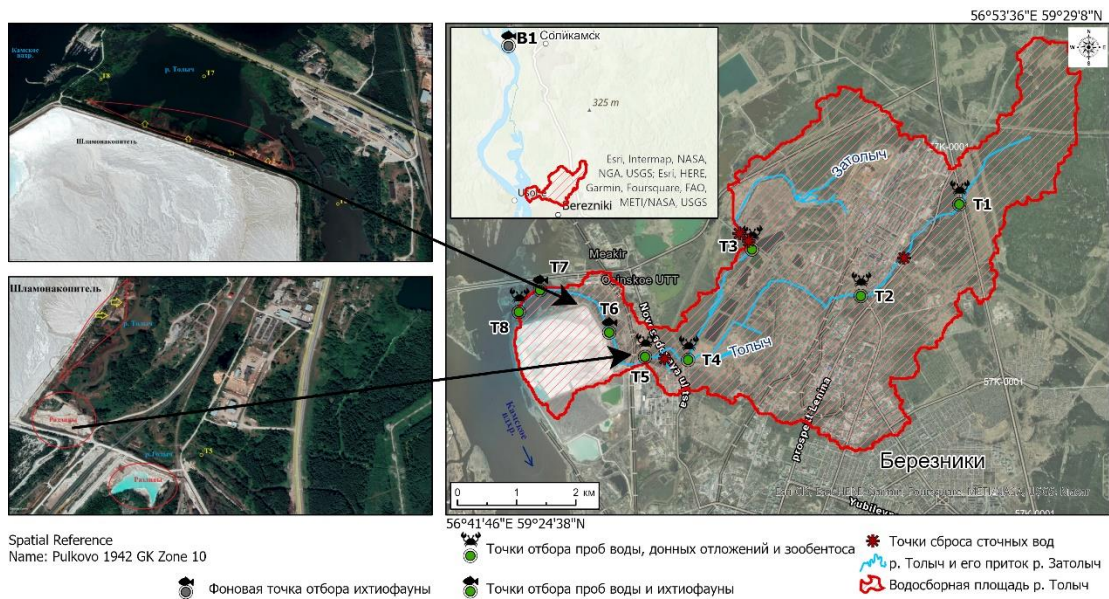


Рисунок 4.1.1 – Комплексная схема опробования в бассейне р. Толыч

На территории водосбора р. Толыч расположены крупные промышленные предприятия химической, энергетической промышленности и цветной металлургии с необходимой инфраструктурой и объектами накопленного вреда. Анализ формирования химического состава вод проведен на основании информации Камского БВУ о предоставлении водных объектов в пользование и статусе их водопользования (таблица 4.1.1). Одним из основных источников поступления химических элементов в водный объект являются сбросы сточных вод предприятия

цветной металлургии, расположенного выше точки опробования Т2 в 9,47 км на расстоянии от устья. При этом доля поступления отдельных исследуемых элементов (V, Mn, Cu, Cr³⁺, Zn) от объема сброса сточных вод составляет менее 1%, за исключением Fe_{общ}, поступление которого составляет 4%. К основным источникам загрязнения в пределах исследуемого водосбора относятся макрокомпоненты и нефтепродукты. До 2021 года до 95% сброса сточных вод в р. Толыч осуществлялось без очистки, остальные 5% – это недостаточно очищенные воды.

Таблица 4.1.1 – Водопользование в бассейне р. Толыч по данным Камского БВУ

Водопользователь	Участок на схеме	Водоток	Расстояние от устья, км	Объем сброса сточных вод, тыс.м ³ /год	Характеристика сброса загрязняющих веществ
Предприятие цветной металлургии	Выше Т2	р. Толыч	9,47	561,43	NH ₄ ⁺ , V, взвешенные вещества, Fe _{общ} , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn, Cu, Na ⁺ , нефтепродукты, SO ₄ ²⁻ , сухой остаток, ХПК, Cl ⁻ , Cr ³⁺ , Zn
Предприятие энергетической промышленности	Выше Т3	р. Затолыч	1,8 и 2,0	1879,46	Взвешенные вещества, Fe _{общ} , Na ⁺ , нефтепродукты, SO ₄ ²⁻ , сухой остаток, Cl ⁻
Предприятие химической промышленности	Выше Т5	р. Толыч	2,5	42304,51	Взвешенные вещества, Fe _{общ} , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , нефтепродукты, SO ₄ ²⁻ , сухой остаток, ХПК, Cl ⁻

Река Толыч является левобережным притоком р. Камы (Камское водохранилище), впадает на 891 км от устья. Общая длина водотока составляет 13 км. Площадь водосбора составляет 35,1 км², из них большую часть река протекает в промзоне г. Березники. Основным притоком р. Толыч является р. Затолыч (длина реки менее 10 км).

Река Толыч относится к водным объектам рыбохозяйственного значения первой категории. Промышленное рыболовство на реках Толыч и Затолыч не осуществляется, при этом в устьевой части р. Толыч развито любительское рыболовство. В соответствии со ст. 65 «Водного кодекса Российской Федерации», ширина водоохраной зоны р. Толыч составляет 100 м. В границах водоохраной зоны р. Толыч расположены большая часть промышленных предприятий, указанных выше.

Бассейн реки Толыч характеризуется нарушенными гидрологическими условиями, связанными в первую очередь с переносом русла еще в конце пятидесятых годах прошлого столетия, наличием более 11 водопропускных сооружений, включая и устьевую часть перед впадением в р. Каму, наличие на реке пруда. Значительная часть территории водосбора покрыта водонепроницаемым покрытием, нарушающим поступление атмосферных осадков. Для данного объекта существенна техногенная составляющая стока, связанная со сбросом сточных вод в объеме до 47 млн м³ ежегодно. В связи с этим в бассейне р. Толыч на разных его участках наблюдаются разные гидрологические условия, которые в свою очередь определяют и

гидрохимический режим. Так наибольшая скорость потока зафиксирована ниже сброса сточных вод от предприятия химической промышленности, что и вполне объяснимо поскольку до 94% сбросов сточных вод поступает на участке за 2,5 км от устья реки (таблица 4.1.1). При этом увеличение стока в 3 раза наблюдается в точке опробования Т2 после сбросов сточных вод, относительно точки Т1 (таблица 4.1.2).

Воды р. Толыч характеризуются нетипичным для данной природной зоны гидрохимическим составом. Начиная с верхнего течения реки, минерализация вод на период обследования составила 1,9 г/л, а при проведении дополнительного рекогносцировочного обследования в верховьях бассейна р. Толыч при продвижении выше по течению от Т1 минерализация достигала 2,1 г/л. Основным возможным источником, определяющим увеличение минерализации вод и содержания хлорид-ионов, рассматривается родниковая разгрузка в верховье, которая была выявлена при обследовании и проявлялась в виде мочажин. Возможно также влияние перетока подземных вод из нижележащего водоносного горизонта в местах пробуренных старых солеразведочных скважин, влияние тектонических, гидрогеологических и техногенных факторов.

В пределах Пермского края выделяются 3 геодинамические активные зоны. Крупнейшая из них Березниковская попадает на территорию ВКМКС и имеет высокую плотность линеаментов и зон мегатрещиноватости, где по ослабленным участкам происходит переток подземных вод из нижележащих горизонтов в вышележащие (Копылов, 2022; Копылов и др., 2020; Максимович и др., 2012). Наличие тектонически ослабленной зоны, пересекающей устьевую часть р. Толыч (рисунок 4.1.2), где кроме того имеются затопленные в результате создания Камского водохранилища старые соляные промыслы (Березниковские, Дедюхинские Ленвинские) с большим количеством рассолоподъемных скважин, а также расположение в устьевой части реки объекта накопленного вреда (шламохранилище «Белое море») определяют зону диффузного загрязнения на этом участке реки, которое выявлено по результатам настоящего исследования и проявляется преобладанием здесь речных вод хлоридно-кальциевого состава и донных осадков хлоридно-натриевого состава.

Кроме того, по данным космоснимков на участке от Т5 до устья видны зоны разливов отходов с левобережной части р. Толыч, которые также влияют на состав вод и проявляются увеличением минерализации и вклада Cl^- и Ca^{2+} в ионный состав вод. Отходы шламонакопителя состоят из пульпы с щелочной средой и минерализацией от 27 г/л в действующей части накопителя и до 180 г/л в выпуске из производственного цикла. Содержание солей в водной вытяжке отходов составляет от 1 до 39 г/кг, что связано с технологией производства кальцинированной соды. Так на тонну готового продукта приходится около 1 т хлоридов, 400 кг кальция и порядка 200 кг натрия (Блинов и др., 2019; Красильникова и др., 2021).

Таблица 4.1.2 – Гидрологические и гидрохимические показатели р. Толыч

Показатель	Участок реки							
	Верхнее течение			Среднее течение	Нижнее течение			
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Ширина русла, м	1,1	0,90	0,70	1,6	12,00	—	—	15,00
Средняя глубина, м	0,04	0,11	0,09	0,44	1,01	—	—	1,45
Средняя скорость потока, м/с	0,08	0,24	0,03	0,09	0,28	—	—	0,07
Температура, °С	24,6	17,4	19,4	17,6	33,2	—	—	20
Сухой остаток, мг/дм ³	1936	260	712	884	356	560	852	1052
Гидрохимическая фация по преобладающему иону в весовой форме	$\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+*}$ $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$
рН	7,6	7,7	8,0	7,9	7,6	7,3	7,2	7,3
Сумма солей в водной вытяжке осадка, мг/кг	1435	731	1059	7277	2655	—	—	3124

Примечание: * – голубой цвет – поверхностные воды; черный цвет – донные отложения; прочерк – показатель отсутствует.

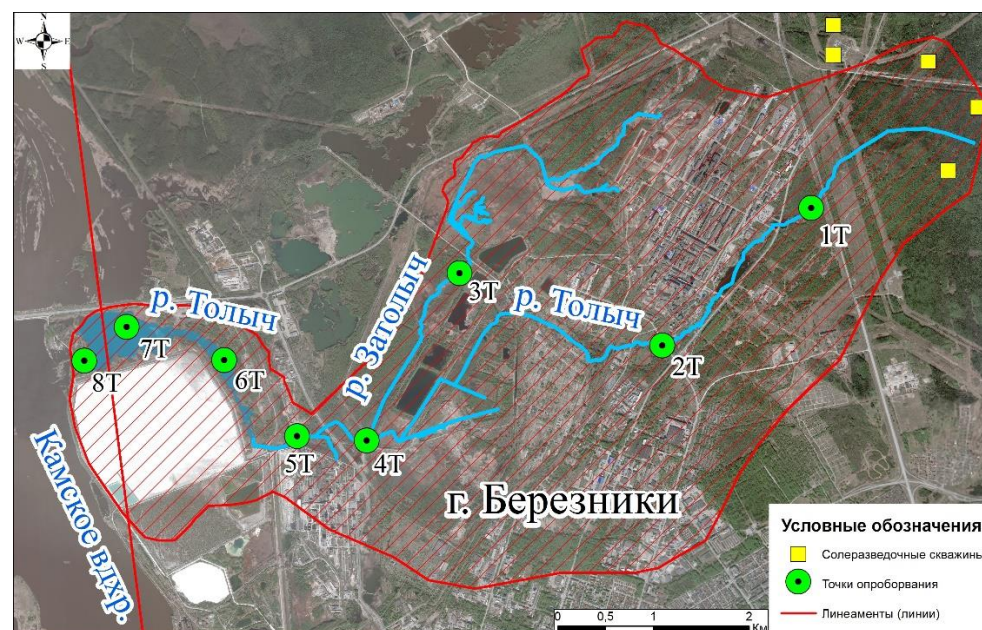


Рисунок 4.1.2 – Расположение солеразведочных скважин и линеаментов в пределах бассейна р. Толыч

4.2 Эколого-геохимическая оценка бассейна р. Толыч

Воды в бассейне р. Толыч отличаются пестрым химическим составом, от верховья к устью гидрохимическая фация вод изменяется от $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ (минерализация 0,3 г/л) до $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ (1,9 г/л), при этом имея схожий состав с донными отложениями. Сумма солей сухого осадка вод р. Толыч изменяется от 735 до 7277 мг/кг с наибольшим вкладом Cl^- и Na^+ (таблица 4.1.2). Максимальное содержание солей зафиксировано в месте слияния р. Толыч и р. Затолыч, что связано с практически застойным режимом на этом участке реки (средняя скорость течения = 0,09 м/с), который способствовал осаждению здесь солей и других загрязняющих веществ. В бассейне р. Толыч преобладает неорганическое загрязнение поверхностных вод, приоритетными загрязнителями являются хлорид-ион и ионы натрия и кальция, среди биогенных элементов – только нитрит-ион, превышение которого достигает 30 ПДК_{рх}.

Использование комплексного подхода к оценке загрязнения вод бассейна р. Толыч по результатам расчета $\text{ИЗВ}_{\text{макро}}$ и $\text{ИЗВ}_{\text{микро}}$ свидетельствуют о разном уровне загрязнения. Наихудшее качество вод выявлено при использовании микрокомпонентов (таблица 4.2.1). Использование для расчета $\text{ИЗВ}_{\text{макро}}$ помимо обязательных показателей (растворенного кислорода, БПК₅) еще и Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , показало вариацию категории загрязнения от вод от чистых (II класс качества вод) до умеренно загрязненных (III класс качества вод).

Таблица 4.2.1 – Качество вод в бассейне р. Толыч

Пункт отбора	ЕІ	ОРІ	WQI	ИЗВ _{макро}	ИЗВ _{микро}
T1	Отсут. эвт.	Загрязнен.	Экстр.загр.	Умерен. загр.	Умерен. загр.
T2	Отсут. эвт.	Загрязнен.	Экстр.загр.	Чистые	Умерен. загр.
T3	Эвтроф.	Экстр.загр.	Экстр.загр.	Чистые	Умерен. загр.
T4	Эвтроф.	Экстр.загр.	Экстр.загр.	Чистые	Умерен. загр.
T5	Эвтроф.	Экстр.загр.	Загрязнен.	Чистые	Умерен. загр.
T8	Эвтроф.	Экстр.загр.	Экстр.загр.	Чистые	Умерен. загр.

В бассейне р. Толыч значения индекса ЕІ составили 0,4-163, что свидетельствует о проявлении процессов эвтрофикации в нижнем течении. Схожие результаты по оценке состояния вод показал индекс органического загрязнения (ОРІ) – воды соответствовали загрязненным в верхнем течении, в нижнем течении отмечен экстремальный уровень загрязнения. При этом наихудшее качество вод выявлено в точке опробования T5, которая расположена ниже сбросов сточных вод химического предприятия.

Использование индекса WQI для определения качества вод, при расчете которого применяли 14 параметров, выявили категорию «загрязненные воды» в точке опробования T5. В остальных точках опробования уровень загрязнения соответствовал экстремальному. Согласно

классификации воды, относящиеся к первому уровню ($WQI=0-25$), требуют экстренной очистки перед повторным использованием. Рекомендации для вод в точке опробования Т5, где выявлен второй уровень загрязнения ($WQI=26-50$), – применение для технологических нужд или других аналогичных целей с низкими требованиями к качеству вод (Son et al., 2020).

Во многих зарубежных странах для определения качества вод успешно используют различные многочисленные модификации показателя качества воды (Water Quality Index, WQI) с учетом разных геоморфологических и климатических характеристик водосборных территорий. За период 1960-2021 годов в опубликованных источниках зафиксировано более 20 индексов, основанных на WQI: CCME, NSF, FIS, MWQI, Horton и т.д. В различных модификациях этого показателя качества воды, содержание и перечень загрязняющих веществ всегда варьируется. В большинстве модификаций для оценки качества воды в зависимости от специфики загрязнения водного объекта использовали от восьми до одиннадцати показателей загрязнения, таких как температура, мутность, pH, взвешенные вещества, сухой остаток, колиформные бактерии, растворенный кислород, БПК, ХПК, нитратный азот, фосфат-ионы и в меньшей степени микроэлементы (рисунок 4.2.1) (Uddin et al., 2021). В настоящее время модифицированные показатели качества воды WQI рекомендованы природоохранными агентствами в США (OWQI), Канады (BCWQI и CWQI), Сербии (SWQI), Вьетнама, Индонезии, Малайзии (MWQI), Индии (Chidiac et al., 2023).

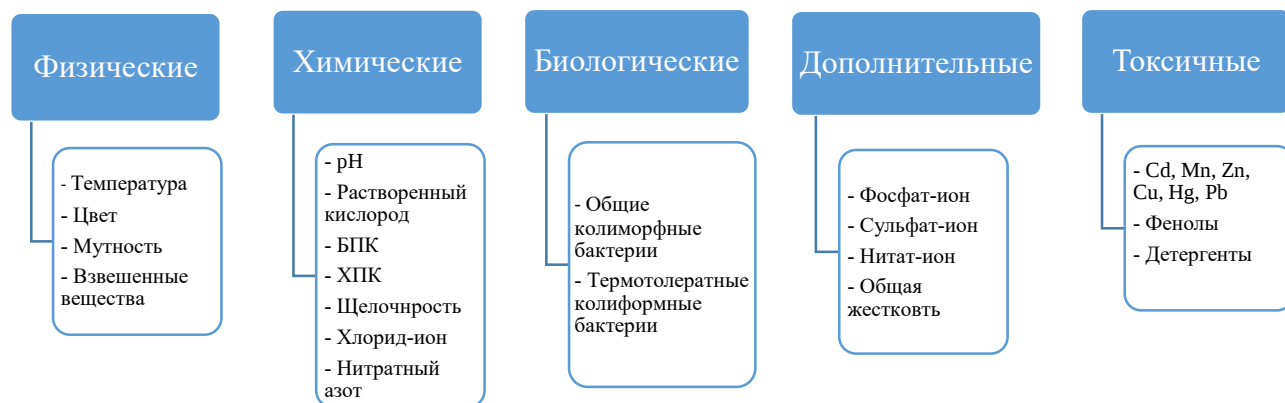


Рисунок 4.2.1 – Показатели, используемые в разных модификациях WQI

Российским аналогом WQI является УКИЗВ, который несмотря на трудоемкость расчетов, за счет использования при расчете широкого перечня показателей при оценке загрязнения, имеет более точные результаты, по которым можно судить о действительной степени загрязнения водоемов (Беякова и др., 2021). Степень загрязнения воды р. Толыч в летний меженный период в 2021 г. на участке после сбросов сточных вод химического предприятия до устья соответствует категории «очень загрязненные» (3б класс). Значения УКИЗВ в нижнем течении р. Толыч совпадают со значениями в створе на р. Камы в черте г. Березники и в створе в 10 км ниже

г. Березники, где они соответствуют 3-му классу качества воды разряд «б», что характеризует воды как «очень загрязненные» (Доклад..., 2021). Все это подтверждает, что воды р. Толыч, поступающие в Камское водохранилище, являются источником поступления загрязняющих веществ.

Показатель PECQ, использованный в качестве экотоксикологического критерия для оценки потенциального токсического воздействия металлов для бентической фауны, показал, что все пробы донных отложений р. Толыч, кроме точки опробования в верхнем течении (Т1), могут представлять потенциальную угрозу для бентической фауны ($0,5 \leq \text{PECQ} < 1,0$), что соответствует умеренной степени воздействия (таблица 4.2.2). В соответствии с классификацией С. G. Ingersoll и др. (2001), донные отложения в точке опробования Т5 ($\text{PECQ}=0,99$) и Т2 ($\text{PECQ}=0,97$) представляют наибольшую угрозу для водных организмов из-за токсического воздействия содержащихся в них металлов. При этом исследователи, использующие показатель PECQ для надежного прогнозирования токсичности донных отложений, отмечают, что значения $\text{PECQ} > 0,5$ уже свидетельствует о токсичности донных отложений и высоком потенциальном риске для донной фауны (Kulbat et al., 2019; Koniarz et al., 2023).

Таблица 4.2.2 – Коэффициенты опасности, рассчитанные для химических элементов в донных отложениях р. Толыч, и средние коэффициенты PECQ

Пункт отбора	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	PECQ	Степень воздействия
Т1	0,26	0,09	0,10	0,09	0,08	1,86	0,13	0,37	Слабое
Т2	3,67	0,51	0,43	0,11	0,15	1,77	0,12	0,97	Умеренное
Т3	0,75	0,52	0,34	0,28	0,37	1,42	0,13	0,54	Умеренное
Т4	1,01	0,67	0,83	0,42	0,00	2,59	0,08	0,80	Умеренное
Т5	1,15	0,54	0,44	0,32	2,28	2,20	0,00	0,99	Умеренное
Т8	0,87	0,30	0,25	0,29	0,40	1,28	0,39	0,54	Умеренное

Превышение содержаний ртути в донных отложениях относительно уровня РЕС на всем протяжении р. Толыч, а также разовые превышения уровня ТЕС по цинку, меди, мышьяку и кадмию могут оказывать острое и хроническое воздействие на представителей зообентоса. Поскольку донные животные в текучеводных экосистемах являются основой трофической базы рыб, это будет приводить и к аккумуляции металлов в телах гидробионтов, передаче их по трофической цепи, в конечном итоге, достигая человека (таблица 4.2.3). Это прежде всего касается ртути. Основными маркерами высокой концентрации ртути в среде являются поражения мозга и почек, катаракта, нарушения развития и процессов воспроизводства у рыб (Morcillo et al., 2017). Все это ставит задачу изучения морфологических и физиологических отклонений у представителей ихтиоценоза в р. Толыч.

Таблица 4.2.3 – Токсическое воздействие некоторых химических элементов на водную биоту (Kolarova et al., 2021; Brix et al., 2017)

Элемент	Токсический эффект
Cr	- Нарушает рост и дифференциацию регенерационной бластемы разных видов беспозвоночных и позвоночных - Влияет на нервную систему рыб - Замедляет скорость фотосинтеза - Снижает скорость фильтрации у моллюсков
As	- Легко аккумулируется организмами зообентоса - Вызывает поражения лёгких, сердечно-сосудистой и мочеполовой систем, желудочно-кишечного тракта у позвоночных - Производит токсический эффект на всех гидробионтов
Cd	- Вызывает окислительный стресс у рыб, провоцируя образование активных форм кислорода. Является мутагеном - Задержка роста и токсичность для печени, почек у рыб - Вызывает снижение темпов размножения и скорости роста у фитопланктона - Влияет на продуктивность и смертность гидробионтов
Cu	- Нарушает хемосенсорные функции гидробионтов - Нарушает осморегуляцию у рыб - Вызывает изменение структуры гидробиоценозов
Hg	- Поражает клеточные стенки и мембраны у водных беспозвоночных, особенно в стадии личинки - Приводит к снижению концентрации хлорофилла в фитопланктоне - Вызывает разнообразные физиологические, репродуктивные и биохимические аномалии у рыб
Ni	- Нарушает ионный обмен, ингибирует дыхание, вызывает окислительный стресс у гидробионтов - Снижает доступность кальция, что приводит к аномалиям в развитии раковин, панцирей и костей у водных организмов - Оказывает цитотоксический эффект, приводит к образованию опухолей у водных организмов. - Тормозит рост и размножение гидробионтов, нарушает энергетический обмен
Zn	- Вызывает биохимические и физиологические изменения у рыб

Наиболее типичными движущими силами интенсификации обмена микроэлементов в системе «донные отложения ↔ поровый раствор» являются кислотно-щелочные условия среды, которые отражаются значениями pH (Папина, 2004). Так согласно pH-условиями объясняется аккумуляция Hg и Cd в бассейне р. Толыч. При нейтрально-щелочных условиях среды Hg характеризуется очень низкой подвижностью, а Cd – низкой.

Согласно опубликованным данным хлорид-ион в соленой среде образует устойчивый комплекс с элементами, выделение которых в осадок увеличивается при повышении уровня солености. Ртуть хорошо мигрирует в хлоридно-натриевых водах с повышенной минерализацией в виде HgCl^+ , HgCl_2 и HgCl_3^- , а с повышением температуры растворимость хлоридных и других комплексов Hg возрастает (Иванов, 1997). Увеличение содержания NaCl значительно повышает активность Cd и Pb (Li et al., 2020). Также исследованиями было подтверждено, что соленость

повышает подвижность Cd и его поглощение водорослями, что определяет содержание кадмия в донных отложениях в количествах значительно превышающих санитарные пороги и нормы качества (Du Laing et al., 2008).

Сравнение результатов экспериментов (Zhao et al., 2021) в двух состояниях потока показывает, что тяжелые металлы в осадке проточной воды были более стабильны, чем в статической воде. Так Pb, Cr и Mn, содержащиеся в донных отложениях, обладают сильной степенью десорбции и вновь попадают в речные воды. При этом даже за короткое время возмущение воды может способствовать выделению этих элементов из осадков в вышележащей слой воды.

Исследователи (Boyd et al., 2017) отмечают, что биоаккумуляция Hg в форме MeHg является биодоступной, такие соединения попадают в основу водных пищевых цепей в результате поглощения первичными продуцентами, далее они переходят на более высокие трофические уровни (гидробионты, птицы), где происходит поглощение MeHg. Высокие концентрации ртути в воде, осадках и рыбе выявлены во фьордах Норвегии, где аккумуляция ртути связана также с формой MeHg (Azad et al., 2019). Для понимания биодоступности Cd и Hg в бассейне р. Толыч необходимо установление минералого-геохимических форм элементов в осадках, влияния факторов среды на формы нахождения этих элементов. Особого внимания заслуживают исследования аморфной составляющей донных отложений, которая демонстрирует наибольшую связь с опасными элементами, в отличие от отложений имеющих сформированную кристаллическую решетку, отличающихся инертностью к аккумуляции вредных веществ, где значительное влияние оказывает гидродинамический режим реки (Silva et al., 2023; Kanbar et al., 2017; Wu et al., 2023).

4.3 Оценка качества воды по биотестированию

Оценка токсичности водных вытяжек из донных отложений методом биотестирования проводилась с использованием двух тест-объектов: биолюминесцентных бактерий - *V. fischeri* (тест-система «Эколюм») и дафний *Daphnia magna* Straus (Daphtoxkit F).

При оценке токсичности с биолюминесцентными бактериями *V. fischeri*, учитывались процентные значения снижения люминесценции при EC₅₀ через 5 и 15 минут воздействия на 6 образцов донных отложений р. Толыч. Результаты снижения люминесценции были нормализованы для расчета ингибирования по отношению к контролю (рисунок 4.3.1). Анализ средних значений EC₅₀ показал, что 3 образца соответствуют умеренной токсичности ($20 \leq EC_{50} < 50$, точки опробования 1Т, 4Т, 5Т) и 3 образца – слабой токсичности ($50 \leq EC_{50} < 80$, точки опробования 2Т, 3Т, 8Т).

На рисунке 4.3.2 представлены результаты токсичности 6 проб донных отложений. Индекс токсичности изменялся в пределах от 29 до 66%. Наименьший уровень токсичности зафиксирован в точке опробования 3Т (29%), а наибольший уровень в месте слияния р. Толыч и р. Затолыч. В устьевой части реки донные отложения характеризуются как токсичные (30%). При этом в верхней части водосбора (1Т) донные отложения также характеризуются как токсичные (49%).

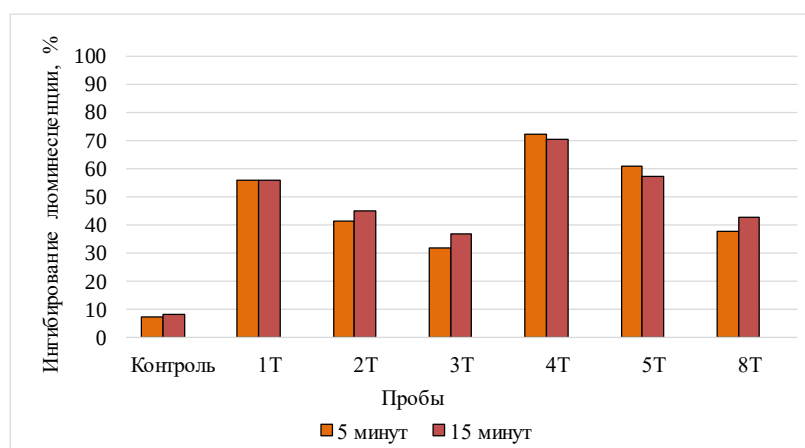


Рисунок 4.3.1 – Ингибирование люминесценции (%) водной вытяжки

В другом эксперименте по определению токсического действия методом биотестирования с использованием тест-объекта *Daphnia magna* Straus, результаты исследования свидетельствуют о том, что водные вытяжки донных отложений р. Толыч не оказывали острого токсического действия на выживаемость дафний. Выживаемость составила 95–100%, как следствие гибель тест-объектов менее 5%, что соответствует нетоксичным осадкам.

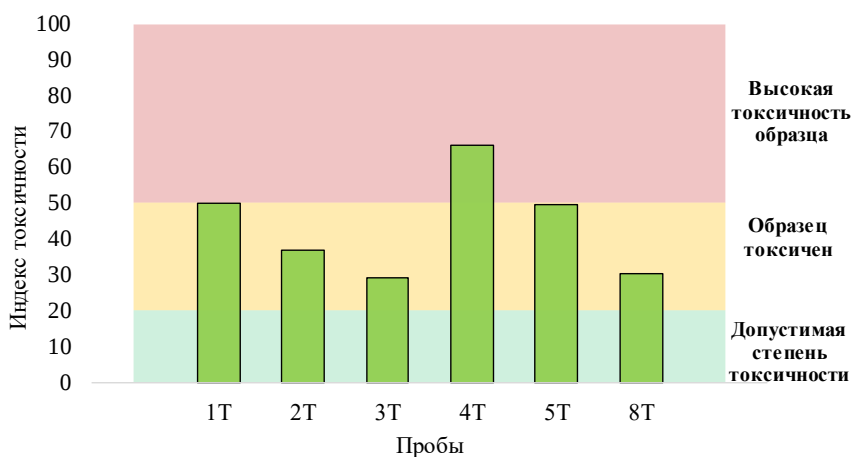


Рисунок 4.3.2 – Индекс токсичности (Т) образцов донных отложений р. Толыч

Исследуемые тест-объекты проявили разную чувствительность к уровню загрязнения. Более чувствительными организмами в данном исследовании являются *V. fischeri*. Использование нескольких организмов при биотестировании донных отложений, принадлежащих к различным трофическим уровням водных биоценозов, позволяет лучше оценить токсичность отложений. Кроме того, различия в чувствительности *D. magna* и *V. fischeri* к различным токсикантам варьируется в зависимости от типа загрязнителя, различного воздействия биодоступных металлов и других токсичных веществ в образцах окружающей среды, где активны процессы поглощения веществ на клеточном уровне (Teodorovic et al., 2009).

Результаты биотестирования продемонстрировали, что *V. fischeri* более чувствительны чем *Daphnia magna* в тестах на острую токсичность, что отмечают и другие исследователи (Flohr et al., 2012). Исследователи подтверждают, что следует использовать несколько тест-организмов, принадлежащих к различным таксономическим группам и представляющих различные уровни пищевой цепи, что является хорошей методикой для интеграции биологического ответа на присутствие различных загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды (Tarnawski et al., 2018). Комплексирование экотоксикологических и химических методов необходимо для адекватной оценки экологического состояния водных объектов, что подтверждается настоящими исследованиями в бассейне р. Толыч.

Результаты свидетельствуют о необходимости развития биотестирования с использованием тест-объектов с различными организационными уровнями, охватывающими диапазон различной чувствительности к способам воздействия, что отмечается в частности в работе (de Castro-Catala et al., 2016). Развитие исследований на более высоких уровнях организации (например, сообщество) также имеет решающее значение для обеспечения экологически значимых прогнозов по оценке токсических эффектов в водных экосистемах, чему посвящены следующие разделы.

4.4 Оценка качества воды по развитию зообентоса

В составе зообентоса рек Толыч и Затолыч зарегистрировано 39 видов и таксонов более высокого ранга. Доминантными видами во всех точках опробования были личинки комаров-звонцов (Chironomidae) и малощетинковые черви (Oligochaeta). Также отмечено локальное преобладание двустворчатых моллюсков (Bivalvia) в точке опробования T2. В меньшей степени среди донных сообществ были обнаружены представители подёнок (Ephemeroptera), ручейников (Trichoptera), веснянок (Plecoptera), пиявок (Hirudinea), брюхоногих моллюсков (Gastropoda),

вислокрылок (Megaloptera), клопов (Heteroptera) и ракообразных (herrustacean). Распределение зообентоса по продольному профилю р. Толыч неравномерно (рисунок 4.4.1).

По результатам расчета биотических индексов бассейн р. Толыч подразделяется на два участка (до и после точки опробования Т5), граница между которыми маркируется точкой сброса сточных вод химического предприятия. Изменение биоиндикационных показателей по продольному профилю реки связано с таксономической структурой зообентоценозов (рисунок 4.4.2). Так выше по течению от точки опробования Т5 зообентос состоял из различных групп беспозвоночных, включая требовательных к качеству воды двустворчатых моллюсков и насекомых, а доля малощетинковых червей в общей численности зообентоса не превышала 22,7%.

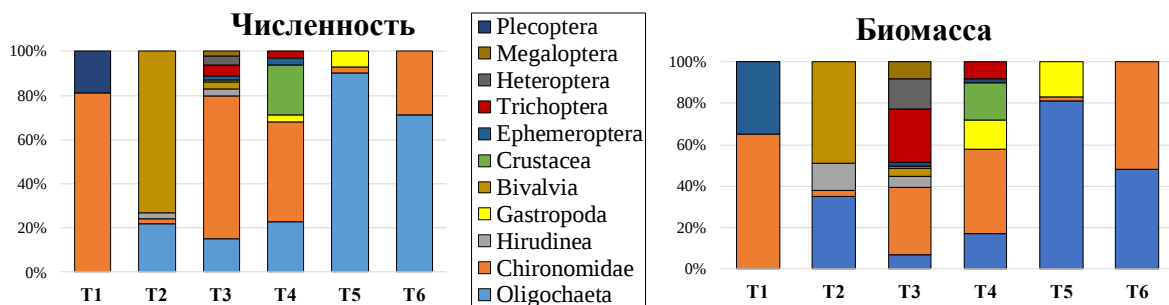


Рисунок 4.4.1 – Структура бентоценозов в бассейне р. Толыч с указанием доли таксономических групп в % от общей численности и биомассы

В целом верхнее течение реки по данным биотических индексов соответствует категории чистых вод. Исключением являются точки опробования Т2, где значения индексов Шеннона и Вудивисса указывают на умеренно загрязнённые воды, индекс Гуднайта-Уитли соответствует категории чистых вод, а индекс Кинга и Болла – грязных вод. Расхождение результатов биотических индексов в Т2 относительно других точек опробования верхнего течения связано с тем, что в составе донной фауны доминируют мелкие двустворчатые моллюски *Conventus conventus*, *Hensloviana hensloviana* и *Euglesa sp.*, на долю которых приходится до 73% численности и 50% биомассы донной фауны, достигающих здесь 12900 экз./м² и 2,76 г/м². К субдоминантам сообщества относятся олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri*.

Известно, что снижение видового разнообразия происходит не только в результате техногенных факторов, но и природных, таких как наличие однообразных биотопов в олиготрофных условиях в достаточно чистой воде или бедность песчаного грунта (Андринова и др., 2022). Так по результатам богатого развития моллюсков *C. conventus* в Т2, тяготеющих к олиготрофным водоёмам (Андрианова, 2015), выявлено хорошее качество вод по

индексу Гуднайта-Уитли, а при этом здесь отмечены заниженные значения индексов Шеннона и Вудивисса.

Низкая величина индекса Кинга и Болла объясняется малой долей насекомых в общей биомассе зообентоса. Это может объясняться не только влиянием загрязнений, но и биотическими отношениями внутри сообщества, в частности, напряжённой конкуренцией насекомых с другими представителями зообентоценоза или выеданием их хищными беспозвоночными – пиявками, доля которых в биомассе донной фауны составляет 13%. Возможно, именно с этим фактором связано обилие на этом участке реки мелких двустворчатых моллюсков, недоступных пиявкам и, вследствие этого, получающим здесь конкурентное преимущество.

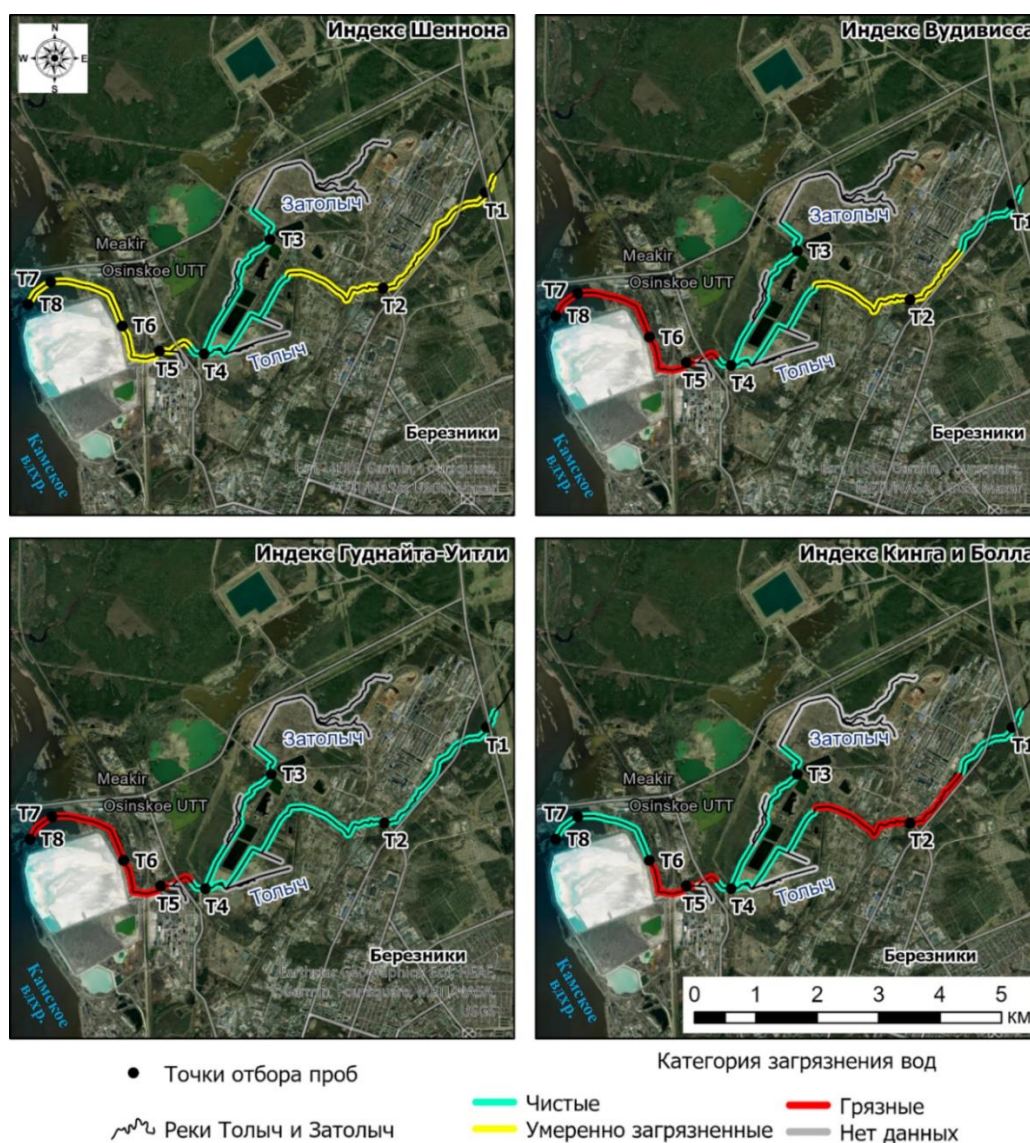


Рисунок 4.4.2 – Экологическое состояние р. Тольч по биотическим индексам, рассчитанным по структуре сообществ макрозообентоса

Ниже сброса сточных вод химического предприятия (Т5-Т8) формируются зообентоценозы с упрощенной структурой. Их основу составляют толерантные к загрязнению олигохеты семейства Tubificidae, на долю которых приходится 71-90% общей численности донной фауны, в то время как требовательные к качеству воды группы животных полностью отсутствуют. Значения биотических индексов Вудивисса, Гуднайта-Уитли и Кинга и Болла соответствуют категории грязных вод, а малая величина индекса Шеннона указывает на сниженное разнообразие сообщества.

Известно, что биотические индексы, используемые в системах экологического мониторинга поверхностных вод, разработаны для оценки органического загрязнения (Яныгина и др., 2022). Однако упрощение структуры донной фауны в нижнем течении бассейна р. Толыч и выпадение из её состава ряда групп с резким увеличением роли малощетинковых червей семейства Tubificidae обусловлено множеством факторов на этом участке реки: поступление больших объёмов сточных вод, составляющих 47-53 млн м³ в период 2011-2021 гг.; химическое загрязнение бассейна р. Толыч с трансформацией ионного состава (HCO_3^- - $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Cl}^-$ - Na^+ или Ca^{2+}) речных вод и донных отложений, как следствие увеличение минерализации; органическое загрязнение (высокие концентрации нитрит-ионов); наличие температурного градиента после сбросов сточных вод до устья ($33^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$); нарушенный гидрологический режим, связанный с переносом русла, наличием большого количества водопропускных труб, что обуславливает медленное течение и, как следствие, накопление загрязняющих веществ в донных отложениях; наличие диффузного загрязнения – с прилегающей водосборной территории, от шламонакопителя «Белое море», разгрузка высоко минерализованных вод от старых рассолоподъемных скважин. Подобные изменения зообентоценозов в продольном профиле реки описаны и другими авторами при рассмотрении каждого отдельного фактора, влияющего на их распределение (рисунок 4.4.3) (Živić et al., 2006; Quevedo et al., 2018).

Сбросы сточных вод от предприятия химической отрасли, осуществляемые в р. Толыч за 2,5 км до устья, соответствуют нормативным значениям, в результате проведенных исследований превышений не выявлено (Ushakova et al., 2023). Сбросы сточных вод, поступающие на данном участке реки, имеют несколько эффектов. Один из них это значительное разбавление воды, что отчетливо видно по уровню минерализации вод (таблица 4.1.2).



Рисунок 4.4.3 – Факторы, влияющие на экологическое состояние р. Толыч

Так в месте слияния р. Толыч и р. Затолыч (точка опробования Т4) минерализация вод составила 884 мг/л, а после сбросов сточных вод – 356 мг/л. Необходимо отметить, что сброс сточных вод в период с 2010 по 2019 г.г. увеличился от 47 до 53 млн м³, что влияло на гидрологическим режим реки увеличением стока в нижнем течении. Результаты биотических индексов свидетельствуют о низком качестве воды, особенно в нижнем течении р. Толыч, которые в свою очередь являются наиболее чувствительными индикаторами деградации водной экосистемы.

4.5 Оценка качества воды по показателям ихтиофауны

По данным Пермского филиала ФГБНУ «ВНИРО», наиболее многочисленными видами в малых реках, расположенных в умеренном климатическом поясе (с континентальным климатом), в зоне тайги в северной части Прикамья, являются плотва, окунь, уклея, речной голец, ёрш, усатый голец, елец. В верховьях встречается хариус и подкаменщик. В прудах на реках обитают карась обыкновенный, верховка, карп, голец озерный, ротан. Видовое разнообразие рыб увеличивается от верховий к устьевым участкам. В период весеннего половодья в реки и на их заливаемые поймы из Камского водохранилища заходят на нерест фитофильные виды рыб (плотва, окунь, лещ, щука, густера, язь, судак). Малые реки служат пастбищем для ранней молодежи и, частично, взрослых особей этих видов рыб (Оценка воздействия..., 2021). В конце лета и осенью большая часть рыб скатывается на зимовку в пруды, расположенные на р. Толыч, и также в Камское водохранилище.

В конце июля 2021 г. нижнем течении р. Толыч на расстоянии 2,1 км от устья реки (точка Т7, рисунок 4.1) температура воды во время отбора проб рыбы была равна 25°C. В этом месте имелся участок со скоростью течения 0,3–0,5 м/с. Наиболее часто встречались глубины 1–1,5 м. Для данного участка характерны участки с медленным и обратным течением. Дно было илистым и песчаным. Ставными сетями, установленными в зоне медленного течения, было отловлено 7 видов рыб: плотва *Rutilus rutilus*, лещ *Abramis brama*, окунь *Perca fluviatilis*, густера *Blicca bjoerkna*, язь *Leuciscus idus*, уклея *Alburnus alburnus* и жерех *Aspius aspius*. В количественном отношении преобладали бентофаги (плотва) и полизоофаги (окунь, язь) (Ushakova et al., 2023). Качество воды в этом месте на основании рассчитанного значения индекса IBI составило 32, что соответствует низкому качеству (таблица 4.5.1).

В озеровидном расширении р. Толыч на расстоянии 0,5 км от устья (точка Т8, рисунок 4.1.2) температура воды составляла 20°C, преобладали глубины 1,4–1,6 м, течение отсутствовало. Кроме береговой линии, остальная часть акватории не была покрыта водной растительностью. Во время исследований уровень воды в озеровидном расширении р. Толыч был выше, чем в Камском водохранилище, смешения воды из водохранилища и р. Толыч не наблюдалось. В ставные сети, установленные в центральной части озеровидного расширения реки и у береговой линии по кромке водной растительности, попали 5 видов рыб: ерш *Gymnocephalus cernuus*, карась *Carassius carassius*, плотва, лещ и окунь. В количественном отношении преобладали полизоофаги (окунь). Значение индекса IBI составило 22 (очень низкое качество воды), что показывает деградацию биоты на нижних трофических уровнях.

Таблица 4.5.1 – Качество вод р. Толыч на основании индексу IBI

№	Metrics	Точки опробования		
		Т7	Т8	Вфон
1	Общее количество видов рыб	5	3	5
2	Число видов-бентофагов, приуроченных к обитанию на течении	1	1	1
3	Число видов, приуроченных к обитанию в стоячей воде	1	3	3
4	Число пелагических видов	3	1	5
5	Число интолерантных к загрязнению видов	1	1	3
6	Процент особей интолерантный к загрязнению видов рыб	1	1	3
7	Процент особей не относящихся к всеядным видам	3	3	5
8	Процент особей видов-планктонофагов	1	1	3
9	Процент особей видов-бентофагов	3	1	5
10	Процент особей облигатных ихтиофагов	3	1	3
11	Среднее число на стандартизированное промысловое усилие	5	1	3
12	Удельный вес особей с болезнями, паразитами и другими аномалиями	5	5	5
Всего		32	22	44

Небольшие глубины в нижнем течении реки Толыч могут свидетельствовать о том, что большинство наблюдаемых видов рыб обитают в этой реке временно в период нереста и летнего

нагула. Скорее всего, наблюдаемые в реке Толыч рыбы, это особи, пришедшие из Камского водохранилища весной на нерест. Впоследствии эти рыбы могут оставаться в реке для летнего нагула в основном из-за более высоких температур в нижнем течении реки Толыч, которые более предпочтительны как для питания, так и для роста (Jeppesen et al., 2010). Затем, при низком уровне воды зимой и более высокой концентрации загрязняющих веществ (Whitehead et al., 2009), рыба с высокой вероятностью мигрирует в Камское водохранилище. Карась – единственный вид, который может обитать круглый год в пределах участка Т8, но его численность, согласно результатам учетных работ, была крайне низкой. В литературе также упоминается преимущественно транзитный состав рыбного сообщества на участках водоемов, подверженных загрязнению (Schinegger et al., 2016; Jurajda et al., 2021).

Тепловое и неорганическое загрязнение, зарегистрированное в р. Толыч, негативно влияет на гидробионтов обитающих здесь, что подтверждается значениями индекса *IBI* и биотическими индексами по зообентосу. В нижнем течении р. Толыч отсутствовали виды с низкой толерантностью к загрязнению, например, судак. При этом были встречены всеядные виды с широким экологическим спектром и бентофаги. Обилие последних связано с низкой избирательностью питания учтенных видов, поэтому снижение разнообразия бентоса, но не его количественных характеристик, не повлекло за собой снижение численности рыб-бентофагов. Отдельно стоит отметить низкую встречаемость планктонофагов, что может свидетельствовать о деградации зоопланктоценозов в результате воздействия загрязнения. Эти результаты соответствуют опубликованным изменениям видового состава ихтиофауны верхней части Камского водохранилища в результате негативного воздействия сточных вод, а также о более высокой чувствительности биотических индексов по сравнению с химическими (Зиновьев и др., 2018; Ghani et al., 2018).

Анализ структуры рыбного сообщества показал, что в нижнем течении реки происходит снижение встречаемости чувствительных к загрязнению видов рыб с преобладанием всеядных и толерантных видов, что приводит к низким значениям индекса *IBI*, что в свою очередь, объясняется высоким уровнем загрязнения вод и донных отложений. В условиях высокого вклада техногенных факторов происходит неодинаковый уровень загрязнения водной толщи и донных отложений р. Толыч, где с учетом низкой скорости течения осуществляется интенсивная аккумуляция загрязняющих веществ и трансформация химического состава этих отложений в результате самоочищения речных вод. В случае нарушения динамического равновесия в системе «вода ↔ донные отложения», может произойти ремобилизация загрязняющих веществ разного класса опасности из донных отложений в водную среду р. Толыч с дальнейшим выносом в акваторию Камского водохранилища, что отмечается в ряде работ (Ваганова и др., 2011; Решетняк и др., 2022). В результате этих процессов донные отложения являются источниками

вторичного загрязнения металлами и другими загрязняющими веществами, сорбированными осадком за длительный период осуществления хозяйственной деятельности в пределах водосбора р. Толыч.

Ухудшение экологического состояния донных отложений р. Толыч проявляется в изменении таксономической структуры бентофауны, в результате чего в составе бентоса присутствуют только толерантные виды олигохет и хирономид, устойчивые к высокой техногенной нагрузке. В свою очередь низкая встречаемость зоопланктонофагов в составе ихтиофауны свидетельствует о деструкции сообществ зоопланктона реки. Как следствие, особенности состава кормовой базы рыб, сформированной в нижнем течении р. Толыч, предопределяют специфику состава и снижение биоразнообразия ихтиофауны.

Определение экологического состояния бассейна р. Толыч только по физико-химическим показателям с использованием абиотических интегральных индексов загрязнения, что часто применяется при организации мониторинга водных объектов, показало, что такой подход не дает адекватной оценки уровня трансформации водной экосистемы. Сравнение биотических и абиотических индексов с использованием р. Толыч в качестве модельного объекта показало, что ихтиофауна, как и зообентос, являются более чувствительным индикатором загрязнения воды в условиях повышенного техногенного воздействия. Зообентос выступает в роли индикатора экологического состояния донных отложений и воды, а ихтиофауна является индикатором функционирования и разнообразия экосистемы реки, отражая изменения на нижних трофических уровнях.

4.6 Индикаторы техногенного загрязнения водных объектов в условиях сброса сточных вод

Результаты данного исследования по оценке экологического состояния водоемов свидетельствуют о необходимости комплексного подхода, заключающегося в сопоставлении химического состава поверхностных вод и донных отложений с гидробиологическими исследованиями, при этом оценка качества воды и донных отложений по физико-химическим показателям должна проводиться параллельно с исследованиями биоты. Некоторое несоответствие полученных результатов по абиотическим и биотическим подходам связано с тем, что качество вод в первую очередь отражает их экологическое состояние в конкретный промежуток времени, на него влияет и водный режим в течение года. Качество вод по состоянию донных отложений как и использование результатов биоиндикации, свидетельствуют о хроническом загрязнении, что и отмечалось в других работах при экологической оценке рек

промышленно-урбанизированных территорий таких как р. Охта (г. Санкт-Петербург), р. Белая (г. Стерлитамак) и др. (Петров и др., 2022; Засыпкин и др., 2018).

При этом оценка качества вод верхнего слоя воды может сформировать искаженный результат об экологической обстановке водных объектов на территории Соликамско-Березниковской агломерации в связи с тем, что в местах повышенной минерализации поверхностного слоя вод с хлоридно-натриевой или кальциевой фацией формируется неоднородность водных масс, выражающаяся вертикальной стратификацией (Лепихин и др., 2022). Наибольший градиент формируется в придонной области с повышенной минерализацией, которая в итоге приводит к увеличению содержания солей, что демонстрируют исследования в бассейне р. Толыч, где содержание солей в водной вытяжке донных отложений достигает 7277 мг/кг на участках вод с Cl^- - Na^+ фацией. В период летней межени отмечается наибольшая водная стратификация с максимальным содержанием макрокомпонентов в придонном горизонте, выявленная на левом берегу Камского водохранилища в районе г. Березники (Борисов и др., 2022). Поэтому использование комплексного подхода к оценке уровня воздействия на водную экосистему в результате сброса сточных вод необходимо проводить с использованием различных способов, включая биоиндикацию.

В дальнейших исследованиях для экологического состояния водоемов необходимо производить оценку качества вод по глубине, учитывая возможную стратификацию водной толщи. В бассейне р. Толыч зафиксировано экстремальное содержание солей в донных отложениях, которое оказывает существенное влияние на состав и структуру зообентоса. Например, с увеличением минерализации вод часть таксонов зообентоса исчезает (стеногалинные организмы – ракообразные, стрекозы, брюхоногие и двустворчатые моллюски, пиявки и личинки ручейников), а оставшиеся эвригалинные таксоны (личинки мух-береговушек, хирономиды и частично мокрецы) приспосабливаются к новым условиям среды (Безматерных, 2007).

Современное экологическое состояние бассейна р. Толыч характеризуется различным химическим составом вод (преимущественно Cl^- - Ca^{2+} и Cl^- - Na^+) и определяется разными гидрологическими условиями на отдельных участках реки. Сток реки формируется преимущественно за счет техногенных факторов: сбросов сточных вод в верхнем течении; диффузного загрязнения от прудов-отстойников в среднем течении; сбросов сточных вод в нижнем течении в объёме 42 млн м³ в год с диффузным загрязнением от шламонакопителя содового завода (рисунок 4.1.2). Небольшая глубина р. Толыч в сочетании с существенным объемом сброса сточных вод, в том числе и с тепловым загрязнением, повышают уровень температурного градиента в продольном профиле реки, что значительно сказывается на биоразнообразии гидробионтов.

Воды нижнего течения р. Толыч, согласно значениям биотических индексов макрозообентоса, относятся к категории «грязных». Низкое качество воды, оцененное по индексу Карра по составу рыбного сообщества, подтверждает деградацию биоты на нижних трофических уровнях – в частности для зоопланктона. При этом качество вод в нижнем течении соответствует среднему уровню загрязнения, а донных отложений – высокому уровню загрязнения.

В целом в продольном профиле реки зафиксировано существенное изменение таксономической структуры зообентоса – с увеличением уровня загрязнения уменьшалось видовое разнообразие с увеличением биомассы толерантных к загрязнению видов. Результаты индекса видового разнообразия Шеннона не достоверно отражают экологическое благополучие водоема за счет преобладания олигохетных и хирономидных групп. Результаты биотических индексов Вудивисса, Гуднайта-Уитли свидетельствуют о неудовлетворительном состоянии р. Толыч в нижнем течении. Адаптированный мультиметрический индекс Карра для данного водотока подтверждает восприимчивость рыбного населения к интенсивному техногенному загрязнению в нижнем течении, где качество вод по данному индексу характеризуются как «очень грязные». Индекс Кинга и Болла, применяемый для оценки санитарного состояния водоемов, свидетельствует об отсутствии органического загрязнения (таблица 4.6.1).

Такие малые реки как Толыч, имеющие небольшую площадь водосбора со значительной долей площадей (до 47%), занятых промзоной, объектами накопленного вреда и транспортной инфраструктурой, поступлением большого количества сточных вод должны включаться в мониторинг водных объектов с комплексной оценкой экологического состояния по абиотическим и биотическим показателям. Реализация таких мероприятий необходима для понимания влияния стока реки Толыч на состояние Камского водохранилища – важнейшего в рыбохозяйственном и ресурсном отношениях водного объекта Пермского края.

Результаты сопоставления биотических и абиотических подходов на этом модельном объекте свидетельствует, что использование гидробионтов, принадлежащих к различным трофическим уровням водной экосистемы, является информативным методом оценки уровня загрязнения бореальных водоемов в условиях длительного интенсивного техногенного воздействия. Для таких объектов помимо стандартных методов химического анализа вод необходимо использовать методы биоиндикации и биотестирования для оперативного контроля за состоянием водных экосистем.

Кластерный анализ между абиотическими и биотическими индексами выявил два кластера, в первый кластер входят показатели: EI (индекс эвтрофикации) и RI (индекс потенциального экологического риска), и во второй кластер все оставшиеся индексы (рисунок 4.6.1А).

Таблица 4.6.1 – Суммарная оценка экологического состояния р. Толыч

Пункт	Биотестирование донных отложений		Зообентос				Рыбы	Поверхностные воды			Донные отложения		
	<i>D. magna</i>	<i>V. fischeri</i>	Шеннона	Гуднайта-Уитли	Вудивисса	Кинга и Болла	<i>IBI</i>	<i>ИЗВ</i>	<i>HEI</i>	<i>ERI</i>	<i>Zc</i>	<i>PECQ</i>	<i>RI</i>
T1	Нетокс.	Токс.	Ум. загр.	Чистые	Чистые	Чистые	–	Ум. загр.	Низкий	Средний	Оч. высок.	Слаб.возд.	Чрезм.
T2	Нетокс.	Токс.	Ум. загр.	Чистые	Ум. загр.	Грязные	–	Ум. загр.	Низкий	Средний	Оч. высок.	Ум.возд.	Чрезм.
T3	Нетокс.	Токс.	Чистые	Чистые	Чистые	Чистые	–	Ум. загр.	Низкий	Средний	Высок.	Слаб.возд.	Чрезм.
T4	Нетокс.	Выс.токс.	Чистые	Чистые	Чистые	Чистые	–	Ум. загр.	Низкий	Средний	Оч. высок.	Ум.возд.	Чрезм.
T5	Нетокс.	Токс.	Ум. загр.	Грязные	Грязные	Грязные	–	Ум. загр.	Низкий	Средний	Оч. высок.	Ум.возд.	Чрезм.
T6	–*	–	–	–	–	–	Грязные	–	–	–	–	–	–
T7	–	–	–	–	–	–	Очень грязные	–	–	–	–	–	–
T8	Нетокс.	Токс.	Ум. загр.	Грязные	Грязные	Чистые	–	Ум. загр.	Низкий	Средний	Высок.	Слаб.возд.	Чрезм.

Примечание: * - исследование на данном участке реки не проводилось.

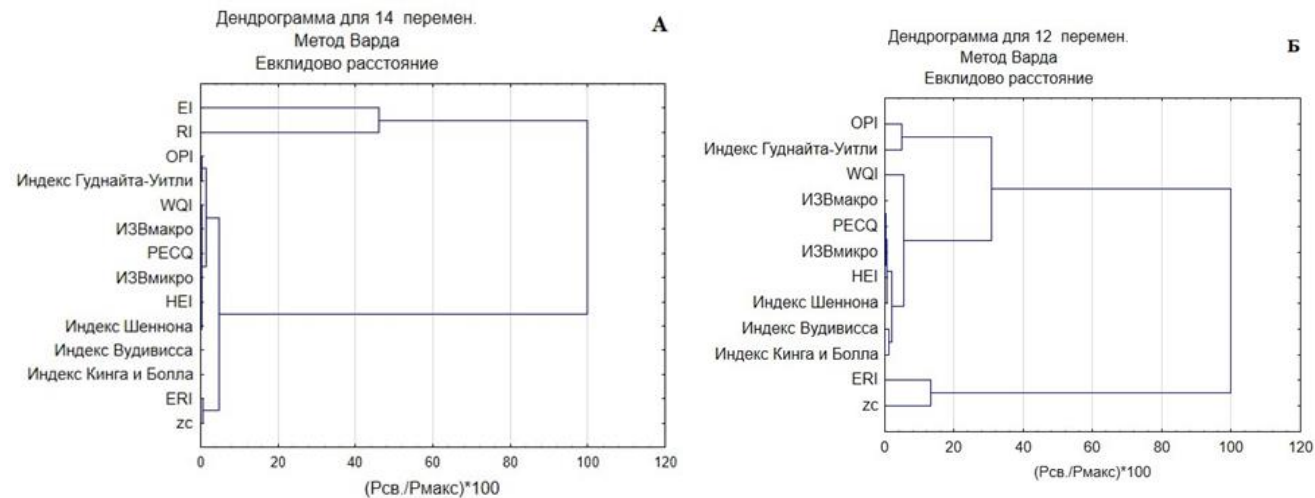


Рисунок 4.6.1 – Дендрограмма, показывающая кластеризацию индексов качества воды для р. Толыч

Отсутствие связей EI и RI с другими показателями обусловлено определённым набором параметров, используемых для их расчета, которые в итоге являются отличными и несопоставимыми для общей экологической оценки бассейна. Использование 12 индексов без EI и RI в кластерном анализе (рисунок 4.6.1Б) выявило три группы: OPI и индекс Гуднайта-Уитли; ERI и Zc; последняя группа – все остальные индексы. В данном исследовании дендрограмма, показывающая кластеризацию индексов, объяснила вариацию результатов биотических индексов. Так показатель OPI имеет тесную связь с олигохетным индексом, являющегося индикатором органического загрязнения, тем самым подтверждая наличие органического загрязнения, которое выражено высокими концентрациями нитрит-ионов в речных водах р. Толыч.

В бассейне р. Толыч на близком уровне сходства зафиксированы два показателя – ERI и Zc, свидетельствующие о возможности использования и сопоставления их результатов для экологической оценки водного объекта.

Использование иерархического кластерного анализа для всех малых рек Соликамско-Березниковской агломерации выявило другие зависимости, что позволяет предположить влияние специфики и типа источника загрязнения.

На рисунке 4.6.1Б отчетливо видна тесная связь между Индексом Вудивисса и индексом Кинга и Болла, которая объясняется индикацией соотношений в них крупных таксонов зообентоса. Многие специалисты отмечают преимущества использования индекса Вудивисса для экологической оценки состояния водоемов, поскольку индикаторные группы таксонов доступны для достоверного определения даже не специалистами, при повышении степени загрязненности водоема представители этих групп исчезают (Полякова, 2007; Масюткина, 2018). Так индикаторами чистой воды считаются поденки (Ephemeroptera), веснянки (Plecoptera), ручейники (Trichoptera), при возрастании степени загрязнения вод обитают только некоторые виды олигохет и хирономид, на что следует обращать внимание при интерпретации результатов в рамках мониторинга водных объектов (Андрианова, 2015; Зыков и др., 2015).

В ряде работ отмечают, что наиболее устойчивыми среди представителей бентосных сообществ к разным типам техногенного воздействия являются малощетинковые черви, которые в свою очередь обладают высокой устойчивостью к органическому и неорганическому загрязнению (Oligochaeta) (Jabłońska, 2014; Калинкина и др., 2011; Попченко и др., 1999). Также олигохеты очень толерантны к воздействию особенно для объектов с медленным течением, поскольку такие реки менее пригодны для обитания других макробеспозвоночных и их численность увеличивается из-за меньшей конкуренции и хищничества (Wan Abdul Ghani et al., 2018).

Индекс видового разнообразия тесно связан с химическим составом вод, донных отложений (HEI, PECQ и ИЗВ по макро- и микроэлементам). Схожие результаты были выявлены

в работе у А. В. Гончарова (2020) при биологической индикации в рамках оценки загрязнения водных объектов в бассейне рек Московской области, где была выявлена тесная связь между индексом Вудивисса и ИЗВ, свидетельствующая, что донные обитатели достаточно хорошо отражают экологическую обстановку.

Апробирование абиотических и биотических экологических индексов загрязнения в р. Толыч продемонстрировало синергетический эффект, отражая реальный уровень загрязнения реки. Важной частью комплексирования результатов этих экологических индексов является интерпретация полученной интегральной информации о качестве среды с учетом факторов воздействия на речной бассейн. Биотические индексы, рассчитанные по результатам биоиндикационных показателей, имеют разные эффекты с учетом зональности (степная зона, таежная зона и т.д.), типа рек (равнинная, предгорная, горная), климатических условий, степени техногенного воздействия, что отмечается в ряде работ по оценке использования биотических индексов и возможности их использования на конкретных водных объектах (Андрианова, 2015; Петров и др., 2022). С учетом специфических условий регионов (климатические, гидрологические и техногенные условия) реализуется практика модернизации и адаптации ряда биотических индексов для конкретных территорий – например, Дании (Danish Stream Fauna Index (DSFI), Иберии (Iberian BMWP/Balkan Biotic Index (BNBI)), Балканского региона (Balkan Biotic Index (BNBI) и др. (Abbasi et al., 2011).

В результате использования четырех биотических индексов по зообентосу установлено, что наибольшую чувствительность к изменениям в р. Толыч продемонстрировали индексы Вудивисса и Гуднайта-Уитли, а также Индекс Кинга и Болла, который показал разный уровень загрязнения, что может быть связано с биотическими отношениями внутри сообщества. Использование индекса Шеннона недостоверно отражает класс качества вод в условиях техногенной нагрузки за счет олигохетного доминирования, в результате чего к результатам этого индекса при оценке качества вод в условиях повышенной техногенной нагрузки необходимо относиться с осторожностью, не рекомендуется его использование при мониторинге водных объектов. В отличие от биотических индексов результаты мультиметрического индекса Карра являются надежными при оценке экологического состояния водоема, что отмечено многими исследователями (Zare-Shahraki et al., 2022; Mamun et al., 2022).

С учетом того, что р. Толыч относится к рыбохозяйственным водоемам первой категории, где в устьевой части осуществляется любительское рыболовство, необходим комплексный мониторинг этого объекта для разработки мероприятий по улучшению среды обитания рыб, заходящих из Камского водохранилища.

ГЛАВА 5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Современное качество вод и состояние экосистем верхней части Камского водохранилища на протяжении последних десяти лет характеризуется как неудовлетворительное, что негативно влияет на гидрофауну водоема (Зиновьев и др., 2011). Результаты данного исследования свидетельствуют о высоком уровне техногенного загрязнения поверхностных вод и донных отложений рек Усолки, Чёрной, Толыч и Зырянки. Комплексные исследования, проведенные в бассейне р. Толыч, подтверждают изменение видовой структуры ихтиофауны, тем самым отражая степень воздействия точечных и неточечных источников воздействия. Высокий уровень загрязнения исследованными металлами и металлоидами изученных малых рек, особенно в нижнем течении, является источником поступления этих элементов в акваторию Камского водохранилища на участке от г. Соликамска и г. Березники.

Система мониторинга качества малых и средних рек, а также развитие и управление водными ресурсами на территории Соликамско-Березниковской агломерации в настоящее время развиты недостаточно. При этом региональные проблемы водопользования малых рек промышленных агломераций имеют ряд проблем и в других регионах России, где государственные полномочия различных структур по развитию и управлению водными ресурсами зачастую не согласуются друг с другом (Тасейко и др., 2019). Нерациональное использование водных ресурсов и отсутствие взаимодействия между федеральными структурами, специализированными службами, инспекциями в области экологии и природопользования приводит к ухудшению экологического состояния водных объектов. Отсутствие экологического менеджмента в области инвентаризации малых рек на территориях с повышенным техногенным воздействием приводит к изменению химического состава поверхностных вод этих объектов, накоплению опасных элементов, нефтепродуктов и других соединений в донных отложениях, и как следствие к угнетению водного сообщества (Мингазова и др., 2014).

Целью любой инвентаризации водных объектов является определение загрязняющих веществ, влияющих на экологическое благополучие водоёма, а также информационное сопровождение мероприятий по восстановлению, экологической реабилитации и поддержанию максимально естественного состояния малых рек и их речных долин (Черных и др., 2015). Экологическое водопользование на территории Верхнекамья является неотъемлемой частью социальной, экологической и экономической безопасности региона, которые находятся в полномочиях государственной власти и структур в области охраны окружающей среды и природопользования.

5.1 Анализ существующей структуры мониторинга водных объектов

Концепция мониторинга водных объектов заложена на Стокгольмской конференции ООН 1972 г. по проблемам окружающей среды. На территории Российской Федерации мониторинг водных объектов осуществляется на основании Водного кодекса РФ и Федерального закона «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. №7-ФЗ, а также согласно единому стандарту нормативных актов и программ, связанных с водными ресурсами (рисунок 5.1.1). Оценка загрязнения водных объектов осуществляется в рамках государственного мониторинга окружающей среды на локальном, территориальном, региональном и федеральном уровнях (рисунок 5.1.2).

Водоохранное законодательство

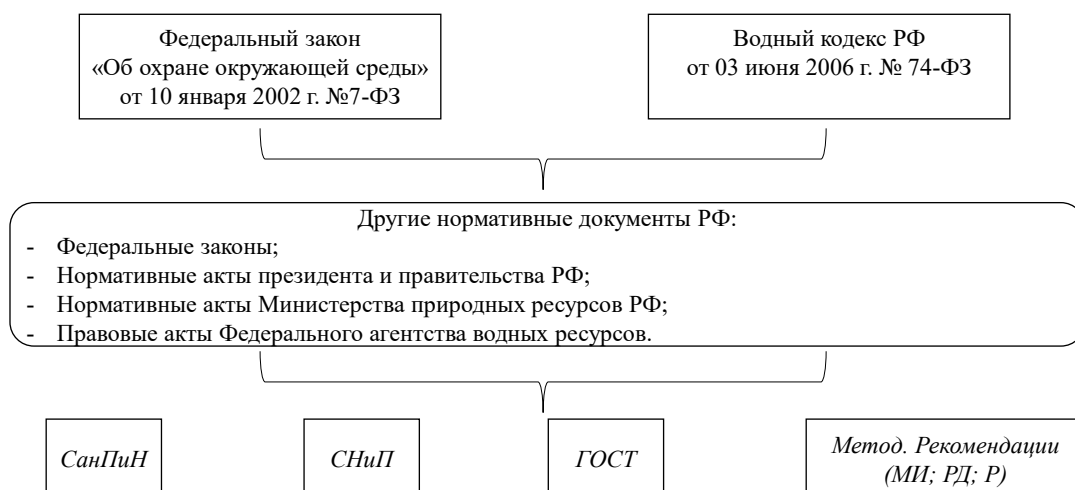


Рисунок 5.1.1 – Правовая основа организации мониторинга водных объектов в России

Локальный уровень мониторинга осуществляется собственными силами водопользователей (производственные экоаналитические лаборатории), которые ведут систематические наблюдения за водными объектами. Как правило такие наблюдения водных объектов являются частью производственного экологического контроля предприятий, в рамках которого водопользователи наблюдают качество вод в результате воздействия сброса сточных вод на фоновом (до выпуска сточных вод) и контрольном створах (после выпуска сточных вод).

На территориальном уровне мониторинг водных объектов осуществляется муниципалитетами городских округов, как на территории исследования – Администрациями г. Березники и г. Соликамска, территориальными органами Министерства природных ресурсов

Российской Федерации и Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Единовременная оценка состояния окружающей среды как на локальном, так и на территориальном уровнях может осуществляться в рамках выполнения инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства.

Мониторинг водных объектов на региональном или бассейновом уровнях осуществляют подведомственные организации Минприроды России (Росводресурсы, Росрыболовство, Росприроднадзор) и другие уполномоченные органы Министерства природных ресурсов на региональном уровне.

Органы государственной власти, уполномоченные осуществлять контроль за использованием и охраной водных объектов

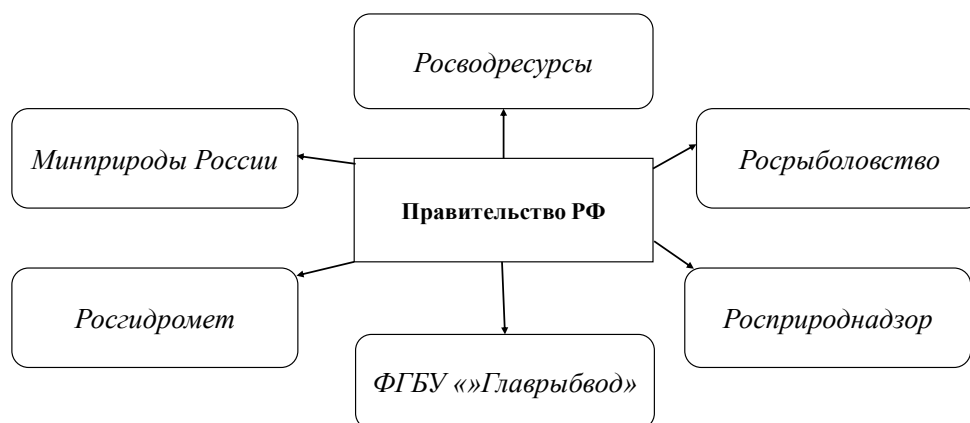


Рисунок 5.1.2 – Структура организации мониторинга водных объектов в России

Современные мониторинговые наблюдения за водными объектами свидетельствуют о важности осуществления комплексной экологической оценки состояния водотоков с учетом всех абиотических и биотических компонентов (гидрологические характеристики, физические, химические и санитарные показатели речных вод и донных отложений, гидробиологические исследования) (Кутявина и др., 2021; Кашулин и др., 2018).

Гидрологические характеристики и качество вод исследуется в рамках Государственной системы мониторинга по наблюдательной сети Росгидромета на поверхностных водных объектах как на незагрязнённых участках, так и районах с повышенным техногенным воздействием (рисунок 5.1.3). Информация о состоянии водных объектов за неделю и месяц по наблюдательной сети гидрологических постов Росгидромета в Пермском крае (региональный (бассейновый) и территориальный уровни) приводится на официальном сайте. При этом специалистами Управления Роспотребнадзора в каждом субъекте РФ осуществляется проверка качества воды,

песка и почвы перед купальным сезоном. Качество вод на территориальном уровне может осуществляться в рамках мониторинговых наблюдений на малых реках, так в г. Перми проводятся наблюдения за качеством вод в реках Ива, Данилиха, Егошиха и Мулянка.

Анализ государственных докладов Пермского края и муниципальных докладов о состоянии окружающей среды свидетельствуют, что наблюдения всех компонентов водных объектов выполняется в недостаточном объеме и периодичности, отмечено отсутствие открытого доступа к данным об экологическом состоянии водотоков. Ежегодно проводятся параллельные наблюдения за водными объектами разными государственными организациями.

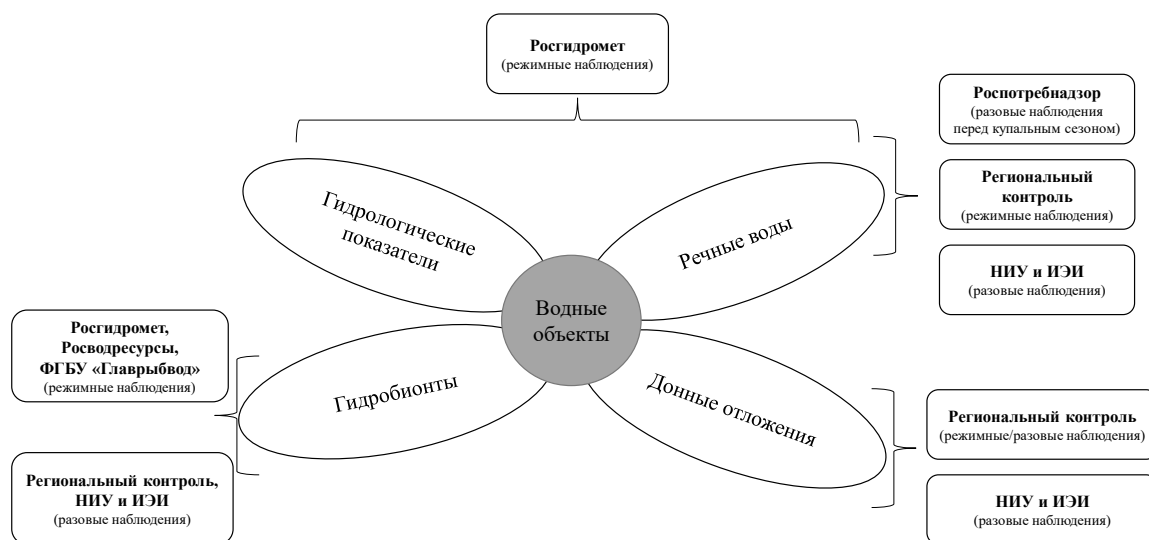


Рисунок 5.1.3 – Существующая система мониторинга водных объектов в России

В пределах Пермского края сеть пунктов режимных наблюдений (круглогодичный мониторинг) установлена преимущественно в пределах Камского и Воткинского водохранилищ, где фиксируются гидрологические и гидрохимические характеристики (физические, химические и санитарные показатели) этих объектов. Так в ежегодных докладах «Состояние и охрана окружающей среды» Пермского края, г. Перми, г. Березники приводится дублирующая, идентичная платная информация о качестве водных объектов по данным Пермского ЦГМС – филиала ФГБУ «Уральское УГМС». Например, информация о качестве вод в Камском водохранилище в районе и ниже г. Березники, Воткинском водохранилище в створе и ниже г. Перми. По данным госзакупок Администрации г. Березники с 2015 по 2019 г.г. оказание услуг по информационному обеспечению такой гидрометеорологической информацией и данными по результатам мониторинга за загрязнением атмосферного воздуха на территории муниципального образования «Город Березники» составило от 215 до 271 тысяч рублей.

Анализ докладов о состоянии окружающей среды Пермского края, муниципальных объектов городов Соликамска и Березники указывает на ряд недочетов в существующей системе экологического мониторинга водных объектов пределах Соликамско-Березниковской агломерации Пермского края, которые не учитывают высокий уровень техногенного воздействия на бассейны малых рек, где ведется активная хозяйственная деятельность в пределах их водосборов, что отмечалось и ранее в исследованиях (Ушакова и др., 2023). Оценка состояния окружающей среды, например, на территории г. Березники осуществляется только на основании гидрометеорологической характеристики объектов из Пермского ЦГМС, статистической отчетности 2ТП (воздух) и 2ТП (водхоз) и эколого-просветительской деятельности, осуществляемой на территории города. При этом по данным госзакупок с 2015 по 2019 гг. на территории г. Березники оценка состояния окружающей среды выполнялась за 1 млн рублей в год. Отсутствие реального контроля за состоянием окружающей среды, в частности за качеством почв и малых рек в пределах таких промышленно-урбанизированных территорий как Соликамско-Березниковская агломерация, препятствует реализации федерального проекта «Формирование комфортной городской среды», поскольку целью проекта является создание условий для системного повышения качества и комфорта городской среды.

Очевидна необходима оптимизация существующей системы территориального экологического мониторинга на территории Соликамско-Березниковской агломерации, когда на локальном уровне муниципалитетов должна быть доступна и открыта для населения программа ведения мониторинга и его результаты (Ушакова и др., 2022). Результатом успешного осуществления мониторинга и использования его результатов станет реализация природоохранных мероприятий по восстановлению загрязненных территорий, выявленных в ходе репрезентативного территориального экологического мониторинга. Это требует взаимодействия различных ведомств, например, Администрация г. Березники и Министерства природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края.

5.2 Российский опыт организации экологического мониторинга водных объектов

Среди региональных докладов в РФ стоит отметить государственный доклад «О состоянии окружающей среды в Красноярском крае» (Государственный доклад..., 2021), поскольку он содержит наиболее полную информацию о структуре и полномочиях организации мониторинга поверхностных вод суши в пределах этого субъекта. Помимо информации о мониторинге по государственной наблюдательной сети Росгидромета, в нем предоставляется информация и о загрязнении поверхностных вод по данным краевой подсистемы мониторинга вод суши. В программу краевой подсистемы мониторинга поверхностных вод суши включены

пункты наблюдений за загрязнением поверхностных водных объектов, расположенных как в районах интенсивного промышленного воздействия, так и на малых реках в пределах населенных пунктов Красноярского края, являющихся приемниками сточных вод. Как правило качество речных вод по данным государственных докладов оценивается по физическим и химическим свойствам в объеме от 30 до 48 различных показателей.

При этом на территории г. Москвы активно осуществляется мониторинг малых рек, основных притоков Москвы-реки, которые традиционно характеризуются более низким качеством воды вследствие существенно меньших расходов воды и значительной степени техногенной трансформации (Доклад..., 2021).

Оценка загрязнения донных отложений в России как правило не является распространенной практикой при осуществлении государственного мониторинга водных объектов. Однако есть частные случаи выполнения работ по мониторингу за состоянием дна и оценке загрязнённости донных отложений. Таким примером является Ленинградская область, где на основании доклада «Состояние окружающей среды в Ленинградской области» в 2022 г. были проведены работы по мониторингу водоохранных зон, дна, берегов и морфометрических особенностей водных объектов, которые выполнены на основании постановления Правительства Российской Федерации от 10.04.2007 №219 (Информационно-аналитический сборник..., 2022). Схожий раздел имеется в докладе для территории г. Москвы. Однако только в Ленинградской области выполнены работы по оценке содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в донных отложениях. Возможно это связано с тем, что только для этой территории утвержден региональный норматив содержания тяжелых металлов в донных отложениях (Региональный норматив..., 1996). Также для территории республики Татарстан в 2019 году утверждены региональные нормативы фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов, которые являются необходимым элементом системы при экологическом нормировании и оценки качества водных объектов (Региональный норматив..., 2019; Иванов и др., 2018).

Мониторинговые гидробиологические наблюдения малых рек так же не являются частой практикой. Профильные институты, находящиеся в ведении Росводресурсы, осуществляют такие наблюдения только в крупных бассейнах (например, Камское и Воткинское водохранилища). При этом рыбохозяйственное значение малых рек и даже самых малых водотоков в Пермском крае является крайне важным в связи с тем, что видовой состав рыбного населения Камского водохранилища подвержен существенным изменениям, связанными с миграциями рыб из водохранилища в малые реки и обратно. В период весеннего половодья при совершении нерестовых миграций многие водохранилищные виды заходят в малые водотоки, а после нереста и летне-осеннего нагула скатывается на зимовку из таких рек в водохранилища.

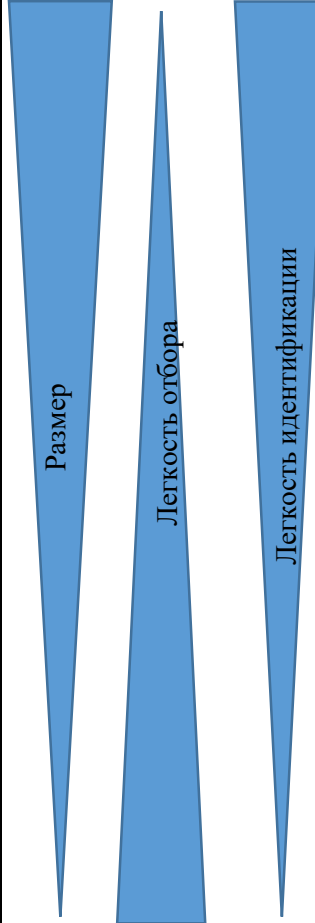
С учетом значительного объема поступления сточных вод в малые реки, а также диффузного загрязнения, необходим репрезентативный мониторинг этих объектов, на основании которого будут предложены эффективные природоохранные мероприятия по их восстановлению на территории Березниковско-Соликамской агломерации. Как показывает опыт выполнения геоэкологических исследований, частой практикой составления рыбохозяйственных характеристик малых рек первой категории уполномоченными структурами в пределах Соликамско-Березниковской агломерации (например, р. Толыч) является выдача информации по реке-аналогу – р. Яйва. При этом реки имеют совершенно отличные друг от друга гидрологические условия и разный уровень техногенной нагрузки. Таким образом, такая рыбохозяйственная характеристика не отражает видовое разнообразие в бассейне р. Толыч и степень техногенного воздействия.

5.3 Зарубежный опыт организации экологического мониторинга водных объектов

Мониторинг поверхностных вод в США и странах ЕС выполняется на основании Водной Рамочной Директивы Европейского Союза (EU Water Framework Directive) и Агентства по охране окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency), он включает мониторинг водных объектов по следующим направлениям исследований: гидроморфологические, гидрохимические и гидробиологические (Безматерных и др., 2020). Опыт Северной Европы и Балтии свидетельствует, что реализация рамочной водной директивы ЕС имеет ряд правовых и организационных проблем, связанных с законодательством каждой из стран и координацией работы между отдельными министерствами и национальными ведомствами (Larsson et al., 2022). Несмотря на комплексный подход, опыт проведения мониторинга в Европе свидетельствует, что экологический статус водному объекту присваивается только на основании биологического мониторинга, где выявлена связь между гидроморфологическими изменениями, переносом взвешенных веществ и биотой (Nones et al., 2017). Исследования отмечают, что различные техногенные нагрузки, оказывающие воздействие на поверхностные воды наилучшим образом, будут выявлены и учтены при правильном использовании методов биологической оценки, которые невозможны без оценки качества среды обитания (речные воды и донные отложения), флоры и фауны водных экосистем (Poikane et al., 2020).

Биологическая оценка водных экосистем может проводиться на основании использования различных экологических группировок гидробионтов – бактериальные сообщества, фито- и зоопланктон, перифитон, макрозообентос, ихтиофауна, применение которых имеют как ряд преимуществ, так и ряд недостатков (таблица 5.3.1) (Keck et al., 2017; Friedrich et al., 1992).

Таблица 5.3.1 – Преимущества и недостатки различных групп организмов в качестве индикаторов качества воды

Гидробионты	Индикаторы	Преимущества	Недостатки
Ихтиофауна	 Размер Легкость отбора Легкость идентификации	Методы хорошо разработаны. Непосредственные физиологические эффекты могут быть очевидны. Можно указывать на эффекты пищевой цепи. Индикаторы гидроморфологических изменений в реке, длительного загрязнения.	Виды могут мигрировать, чтобы избежать загрязнения.
Макрофиты		Виды легко увидеть и идентифицировать. Хорошие индикаторы взвешенных веществ и обогащения органическими веществами. Индикаторы кратковременного загрязнения.	Реакция на загрязнение окружающей среды недостаточно хорошо документирована. Часто толерантны к периодическому загрязнению. В основном сезонный характер.
Макрозообентос		Разнообразие форм и видов. Многие оседлые виды могут указывать на воздействие в месте отбора проб. Целые сообщества могут реагировать на изменения. Долгоживущие виды могут указывать на комплексное воздействие загрязнения в течение времени жизни. Качественный отбор проб. Простое оборудование для отбора проб. Единственный индикатор экологического состояния донных отложений и придонного слоя воды. Большое количество биотических индексов, используемых для оценки качества вод. Различные виды являются индикаторами уровня загрязнения.	Количественный отбор проб затруднен. Тип субстрата важен при отборе проб. Виды могут дрейфовать в движущихся водах. Знание жизненных циклов необходимо для интерпретации отсутствия видов. Некоторые группы трудно идентифицируемы.
Фитопланктон		Устойчивость к загрязнению хорошо документирована. Полезные индикаторы эвтрофикации и повышения мутности. Автоматический подсчет клеток, общей численности.	Требуется таксономический опыт. Не очень полезен при сильном органическом или фекальном загрязнении. Некоторые проблемы с отбором проб. Недостаточная таксономическая изученность. Сложность различия живых и мертвых клеток.
Зоопланктон		Индикатор патогенной фауны, ограничивающей использование водного объекта в целях водоснабжения.	Индикатор эвтрофирования и загрязнения вод (в частности органического и нитратного).
Бактерии		Хорошо разработана рутинная методология. Быстрое реагирование на изменения, включая загрязнение. Индикаторы фекального загрязнения.	Клетки могут происходить не из точки отбора проб. Популяции быстро восстанавливаются после периодического загрязнения. Необходимо специальное оборудование.

Использование при биомониторинге животных сообществ разной видовой принадлежности позволяет учитывать взаимодействие организмов разных трофических уровней, которые отражают и разный уровень воздействия (острое или токсическое). На практике использование всех видов организмов в биомониторинге крайне редко из-за финансовых и логистических ограничений (Birk et al. 2012).

Одним из последних трендов в США, Германии, Японии, Китае является восстановление загрязненных рек, где эффективность каждого проекта подтверждался биологической и гидроморфологической оценкой до начала реализации проектов и через 2-3 года после их завершения (Nuruzzaman et al., 2017; Karthe et al., 2017; Binder et al., 2015). В настоящее время Министерство экологии и окружающей среды Китая собирает экологическую и природоохранную информацию на ГИС-картах. Существует 5 ключевых задач в рамках инициативы Китая по использованию больших данных: индикаторы, мониторинг и оценка, качество данных, прозрачность данных и строгое адаптивное управление (Li et al., 2020).

Наиболее успешно реализуются проекты по инвентаризации и ремедиации загрязненных участков как почв, так и донных отложений в Норвегии среди Европейских стран, где с использованием базы данных национального реестра отображается информация о загрязнённом участке в онлайн режиме на ГИС-картах (Ottesen et al., 2008). Такие карты содержат информацию о местоположении загрязнённых участков, типе и уровне загрязнения, функциональном использовании территории, где после ремедиационных работ статус таких загрязненных участков обновляется в национальном реестре (Ушакова и др., 2022). Такие мероприятия по восстановлению загрязненных участков сопровождаются очень высокими финансовыми затратами (Копчик, 2014). По данным Европейского агентства по окружающей среде (ЕЕА), стоимость проектов по восстановлению обычно составляет от 50 000 до 500 000 евро, а в случае сильнозагрязненных участков может достигать и до 5 миллионов евро (Wcisło et al., 2016).

На современном этапе в России существует необходимость внедрения принципа интерактивности в системе экологического мониторинга поскольку поступление новых данных в интерактивном режиме позволит осуществлять контроль за эколого-геохимической обстановкой с прогнозом возможного развития экологических катастроф, оценкой эффективности реабилитационных мероприятий (Соколова, 2015).

5.4 Принцип организации работы водопотребления, водоотведения и его контроль

Согласно ст. 16 Федерального закона "Об охране окружающей среды" за негативное воздействие на окружающую среду установлена плата, являющаяся формой компенсации ущерба, наносимого загрязнением окружающей среде. К видам негативного воздействия на

окружающую среду относится, в частности, выбросы (сбросы) загрязняющих веществ, размещение отходов производства и потребления. Порядок определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов, другие виды вредного воздействия утвержден Постановлением Правительства РФ.

Каждый водопользователь при сбросе сточных и дренажных вод в водные объекты, ежегодно обязан предоставлять данные по объему и перечню загрязняющих веществ, поступающих в водотоки. Данная отчетность поступает в региональный отдел водных ресурсов бассейнового управления, который в свою очередь является центром по обработке и выдаче информационно-аналитических сведений об использовании воды в Российской Федерации, для Пермского края это Камское бассейновое управление. Далее сведения поступают в межрегиональное управление Росприроднадзора, являющееся администратором платы за негативное воздействие на окружающую среду, в том числе за сбросы загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты. Указанная плата поступает в бюджет Пермского края по нормативу 40% и соответствующие муниципальные образования по нормативу 60%. Также каждый водопользователь обязан предоставлять в Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края следующую отчетность: (1) отчеты о качественном состоянии водных объектов (в соответствии с программой регулярных наблюдений за водным объектом и его водоохранной зоной); (2) планы водоохранных мероприятий; (3) отчеты по выполнению условий водопользования; (4) отчеты по выполнению плана водоохранных мероприятий.

Отчеты по выполнению условий водопользования содержит информацию с перечнем загрязняющих веществ согласно 2ТП-ВОДХОЗ в нескольких пунктах опробования (фоновый и контрольный створы, а также данные по выпуску). Достоверность сведений в отчетности, предоставляемой водопользователями в Министерство, контролируется в сфере реальных данных об объемах забора и сброса сточных вод. В случае превышения показателей в исследуемых створах или выпусках, Министерство передает информацию в Росприроднадзор, который в свою очередь предпринимает меры, штрафы с рекомендацией восстановить загрязненный объект.

В Приволжском федеральном округе поступление сточных вод в поверхностные водные объекты в 2021 г. составило 13% от общего объема в России. Лидером водоотведения в округе является Пермский край с общим объемом 1163,5 млн м³ в год, здесь зафиксировано наибольшее поступление сточных вод без очистки в объеме 33,8 млн м³ (рисунок 5.4.1). При этом до 71% сточных вод без очистки и недостаточно очищенных вод поступает в Камское водохранилище и его притоки первого порядка – малые реки на участке от г. Соликамска до г. Березники.

Наибольший уровень техногенного воздействия за счет задекларированных источников загрязнения выявлен в бассейне р. Толыч с площадью водосбора до 36 км² с существенной (до 47%) долей площадей, занятых промышленными объектами, большим объемом сбросов сточных вод, который изменялся за последние десять лет с 46 млн м³ до 53 млн м³, из которых без очистки сбрасывалось $\approx$ 44 млн м³ (рисунок 5.4.2). С 2021 г. объем сброса неочищенных вод существенно сократился и составил 17 млн м³. Высокий уровень техногенного стока за счет сбросов сточных вод, а также неорганизованного стока в значительной степени изменили качество донных отложений и речных вод этого объекта. При этом высокий уровень загрязнения металлами донных отложений в бассейне р. Толыч отражает техногенное воздействие за длительный период, что подтверждается изменением в структуре бентоценоза с доминированием сообществ толерантных к загрязнению олигохет и хирономид.

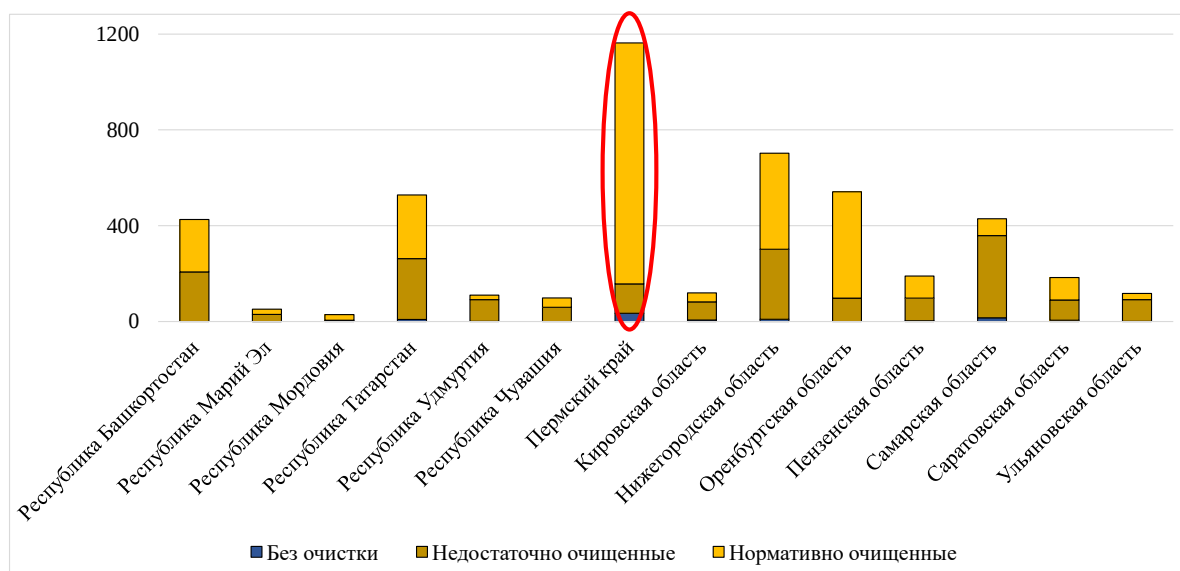


Рисунок 5.4.1 – Объемы водоотведения (млн м³) в 2021 г. в Приволжском федеральном округе

В настоящее время согласно ежегодным экологическим докладом по Пермскому краю, городам Березники и Соликамск информация о негативном воздействии на водотоки предоставляется на основании 2 ТП (водхоз) в виде статистики по объемам поступающих в водотоки сточных и дренажных вод. Ежегодно за негативное воздействие на поверхностные водные объекты в пределах Соликамско-Березниковской агломерации осуществляется исчисление платы за сброс загрязняющих веществ в составе сточных и дренажных вод с промышленных предприятий. Информация о реализации мероприятий по восстановлению загрязненных водотоков (<https://www.permecology.ru/> и <https://admbrk.ru>) отсутствует.

Для нормализации экологической обстановки в верховье Камского водохранилища необходима совместная работа министерств и ведомств для координации действий по

управлению и охране водных ресурсов, направленная на создание качественного территориального мониторинга водных объектов на территориях с повышенной техногенной нагрузкой. В настоящее время гидрохимический контроль малых рек, в которые осуществляется сброс сточных вод, выполняется только самими водопользователями, отсутствует открытость этих сведений, предоставляемых в отчетности предприятий.

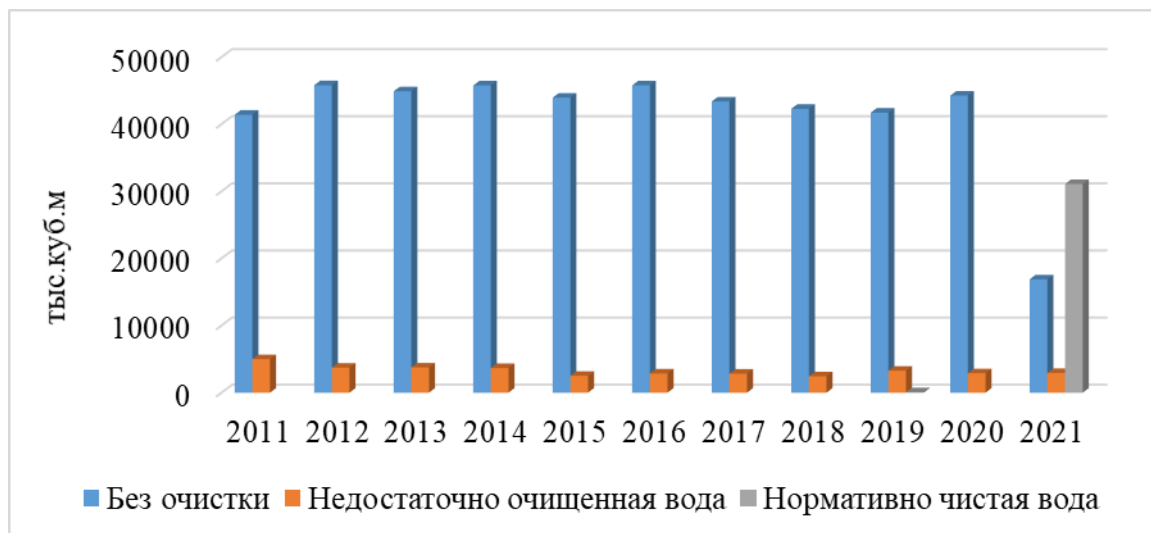


Рисунок 5.4.2 – Объем сточных вод, требующих очистки (тыс. м³) в р. Толыч с 2010-2019 г.г.

На основании анализа существующих экологических проблем на территории Соликамско-Березниковской агломерации, для контроля за качеством вод малых рек необходимо повысить эффективность работы системы экологического менеджмента между природоохранными ведомствами (рисунок 5.4.3) на таких объектах; определить виды и объемы финансирования восстановительных мероприятий, основанных на репрезентативном территориальном экологическом мониторинге малых рек, являющихся приемниками сточных вод; создание правового обеспечения для контрольно-надзорных мероприятий за реализацией экологического мониторинга до и после проведения восстановительных работ.

Приоритетом является обязательное взаимодействие между государственными структурами по развитию и управлению водными ресурсами края по единой дорожной карте в рамках экологического менеджмента, направленного на выявление и восстановление загрязненных водных объектов: администрацией г. Соликамска и г. Березники; Министерством природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края; Государственной инспекцией по экологии и природопользованию Пермского края; структурами Росрыболовства и Росприроднадзора; научно-исследовательскими институтами. Анализ государственных докладов Пермского края и муниципальных докладов о состоянии окружающей среды свидетельствует, что наблюдения всех компонентов водных объектов осуществляется по данным

Росгидромета, которые выполняются в недостаточном объеме и периодичности, ежегодно проводятся параллельные наблюдения за водными объектами разными государственными структурами.



Рисунок 5.4.3 – Экологический менеджмент в Прикамье

Анализ современного состояния качества поверхностных вод России свидетельствует о несовершенстве экономического механизма управления качеством природных вод, низкой эффективности надзорной деятельности, слабой системе мониторинга и статистики, устаревшей и противоречивой законодательной и нормативно-правовой базе управления водными объектами, не соответствующей по ряду показателей установленным нормативам, что приводит к ухудшению качества вод (Данилов-Данильян и др., 2019). Как показывает практика в странах Европы, увеличение затрат на природоохранное регулирование качества водных объектов за счет внедрения регламента REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) позволило в 2014 г. снизить затраты на устранение последствий загрязнения на сумму 0,5-1,7 млрд евро, на стоимость водоподготовки на 3,4-10,9 млрд евро, суммарные преимущества для здоровья общества ЕС составили 6,9-34,3 млрд евро (Аджиенко и др., 2018).

По оценке специалистов, для поддержания (не ухудшения) состояния водных ресурсов в России ежегодно требуется порядка 45 млрд руб., а для улучшения состояния – более 70 млрд руб. (Веницианов и др., 2019). Опыт ЕС демонстрирует, что увеличение затрат на совершенствование нормативно-методических подходов и использование риск-ориентированной системы, направлены в итоге на улучшение качества вод, что позволяет оптимизировать затраты на природоохранные мероприятия и поддержание здоровья населения.

5.5 Опыт реализации мероприятий по снижению негативного воздействия на водные объекты

Как показывают результаты реализации проекта «Оздоровление Волги», основные загрязняющие вещества с водосборных территорий поступают с неорганизованным стоком, превосходя объемы задекларированных источников загрязнения (Веницианов, 2019). Поэтому приоритетным направлением в снижении негативного воздействия на водные объекты является очистка поверхностного стока с промышленно-урбанизированных территорий. За последние 15 лет в России для очистки поверхностного стока в Санкт-Петербурге и Ленинградской, Псковской и Новгородской областях, Республике Карелия введено в эксплуатацию более 1000 пассивных систем очистки, где в процесс очистки включаются собственники территорий, что повышает их ответственность за охрану окружающей среды, снижая нагрузку на местные бюджеты (Ким и др., 2017).

В зимне-весенний период талый сток в пределах урбанизированных территорий, который характеризуется хлоридно-натриевым составом и повышенной минерализацией, высоким содержанием токсичных микроэлементов, беспрепятственно попадает в ближайшие водные объекты в период снеготаяния, что было выявлено на территории Соликамско-Березниковской агломерации, а также в г. Перми (Ushakova et al., 2023; Хайрулина и др., 2020). Проблема отсутствия ливнеотводных канав в пределах городских территорий является одной из актуальных проблем, в результате чего происходит загрязнение рек, что отмечается исследованиями по р. Туре в г. Тюмени (Воронов и др., 2018). Однако традиционные подходы к управлению ливневыми стоками в целях охраны окружающей среды оказываются несостоятельными, поскольку при снижении загрязняющей нагрузки не учитываются изменения режима стока, т.к. в городах преобладает водонепроницаемое покрытие водосборных территорий, что имеет определенный гидрологический эффект (увеличение частоты, величины и объема ливневого стока; уменьшение величины летнего и зимнего базового стока в результате снижения инфильтрации) (Burnes et al., 2012). В российской практике активно внедряют концепцию «зеленой инфраструктуры» в городской среде г. Москвы, г. Хабаровска и г. Перми, где активно внедряются дождевые сады, водопроницаемые тротуары, биофильтрационные склоны, биодренажные канавы (Зайкова и др., 2022; Морозова и др., 2018).

Минимизация негативного воздействия на окружающую среду является новым приоритетом крупных недропользователей, она связана с изменением природоохранного законодательства и поднятием тарифов за плату. Например, при использовании новейших природоохранных мероприятий и внедрении высокоэффективных доступных технологий к ставкам оплаты за негативное воздействие применяются дополнительные понижающие

коэффициенты (Пономарев, 2018). Так в настоящее время в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей осуществляется утилизация крупнотонажных отходов калийной промышленности в шахтном пространстве, что направлено с одной стороны на безопасность добычи калийных солей (защита подземных рудников от затопления, снижение просадки земной поверхности, сокращение площадей солеотвалов и шламохранилищ), но при этом имеет и большое природоохранное значение.

На калийных комбинатах в г. Березники и г. Соликамске активно используются системы промышленного оборотного водоснабжения, где повторно используют очищенные и дезинфицированные хозяйственно-бытовые, дождевые и промышленные стоки. Эти меры позволяют существенно сократить как объем сточных вод, сбрасываемых в водоемы, так и забор свежей природной воды в производственный цикл (Ushakova et al., 2023). Модернизация и реконструкция очистных сооружений на предприятиях также имеет свой несомненный положительный эффект. Так, например, с 2021 г. в бассейне р. Толыч произошло сокращение сбросов сточных вод без очистки на 70% (на 31 млн м³) от ежегодного объема за последние 10 лет (рисунок 5.4.2).

Одним из ярких примеров по снижению техногенного воздействия на бассейн р. Толыч стало создание и использование уникального промышленного канала открытого типа в г. Березники, в который поступают промышленные стоки от предприятий химической и металлургической отраслей, а также коммунальные стоки и ливневые воды. За более чем пятидесятилетнюю историю эксплуатации промышленного канала, в нем сформировалось большая толща тонкодисперсного осадка Cl-Ca, Na, и K состава за счет концентрации хлоридов в сточных водах, которая достигала 31 г/л (Ушакова и др., 2023). В целом накопленные отложения в промканале относятся к объектам накопленного вреда, а в прирусловой части поймы канала зафиксированы вторичные солончаки, здесь почвы сильно засолены щелочными солями, токсичными для растений, что характеризует специфику трансформации прилегающей территории в долине промканала (Москвина и др., 2023).

5.6 Предложения по организации экологического мониторинга на территории г. Соликамска и г. Березники

Результаты комплексной эколого-геохимической оценки состояния бассейнов рек Усолка, Чёрная, Толыч и Зырянка свидетельствуют о значительном поступлении токсичных микроэлементов в акваторию Камского водохранилища, что снижает его рекреационное и водохозяйственное значение на участке от г. Соликамска до г. Березники. Своевременный контроль, охрана и восстановление водных объектов в пределах акватории верхней Камы

является актуальной и важной задачей в ключевых стратегических направлениях РФ по оздоровлению бассейна рек Камы и Волги. Гидрологический, гидрохимический и биологический режим верховья р. Камы предопределяет экологическую ситуацию нижележащей акватории Волго-Камского бассейна. Решение вопросов улучшения экологического состояния малых и средних рек на территории верхней Камы возможно только на основании комплексного подхода при сотрудничестве местных и региональных органов государственного управления, бассейновых советов, ассоциаций водопользователей, научных и общественных организаций.

Повышение уровня засоления (увеличение хлоридов натрия, калия и кальция) в реках Соликамско-Березниковской агломерации, которое связано как со сбросами сточных вод предприятий, использующих в своем производстве рассолы или соли Верхнекамского месторождения, так и диффузным загрязнением, что отмечается во многих работах (Хайрулина, 2022; Лепихин и др., 2020; Бельтюков, 2000). Помимо того, что засоление является стресс-фактором для водных организмов, в условиях засоления Cu, Ni, Zn даже в малых концентрациях оказывают токсическое воздействие на гидробионты (Шилова, 2014).

Наибольшую опасность вызывают высокие концентрации Hg и Cd в донных отложениях рек Усолки, Толыча и Зырянки, поскольку они являются высокотоксичными металлами. Особая опасность связана с биодоступным двухвалентным кадмием, который имитирует под двухвалентный кальций и включается в биологические функции, оказывая при этом токсическое воздействие, вызывая гибель клеток, тканей и организма в целом (Силкин и др., 2017; Фазлыева и др., 2021). Высокие концентрации Ni, Cu, Zn в водной среде (отмеченные в р. Чёрной и р. Толыч) способны нарушать целостность физиологических и биохимических процессов у гидробионтов (Моисеенко, 2019).

Учитывая важную роль малых рек Соликамско-Березниковской агломерации как нерестилищ и кормовой базы водной фауны, они оказывают значительное влияние на экологическое состояние более крупных водотоков (как р. Кама) и играют важную роль в воспроизводстве многих видов рыб, что подтверждают рыбохозяйственные характеристики этих объектов, выданные структурами федерального агентства Росрыболовства (ФГБУ «Главрыбвод» и «ПермНИРО»). Современная ихтиофауна в Камском водохранилище представлена 31 видом рыб, относящихся к 11 семействам, среди них наиболее многочисленными и широко распространенными видами являются лещ, плотва, синец, судак, окунь, чехонь, щука, густера, язь, уклейка, налим и ерш (Казаринов и др., 2021). Кроме того, лещ, плотва, чехонь, судак и щука являются основными объектами промысла на водных объектах Пермского края (Давлетов, 2019).

По данным рыбохозяйственной характеристики р. Чёрной ихтиофауна этого объекта до начала отрицательного техногенного воздействия была довольно разнообразна и включала виды, характерные для бассейна р. Камы. Наиболее распространенными видами в р. Чёрной были

плотва, окунь, уклея, обычными – язь, елец, ерш, пескарь. В устье обитал лещ. В период активного сброса сточных вод постоянная ихтиофауна в р. Чёрной отсутствовала, что обусловлено высокой минерализацией вод (до 15 г/л), чрезвычайно высокие концентрации хлоридов (до 6 г/л) вызывали биологическую деградацию (Ushakova et al., 2023).

Современный техногенный сток р. Чёрной, сформированный сбросами сточных вод предприятиями химической промышленности, отведен в настоящее время в отстойник посредством специально построенного канала. При этом естественное русло р. Чёрной сформировано значительной толщей тонкодисперсных аллювиальных отложений (с высоким содержанием Sr, Ni, Co, Mn, Mo, Se, V, Li), которые являются долговременным источником первичного и вторичного загрязнения вод Камского водохранилища, особенно в период затопления залива устья реки (Меньшикова, 2022). Весной, в период высокой воды, в приустьевой участок р. Чёрной возможен заход из Камского водохранилища таких видов рыб, как окунь, плотва, язь, густера, ёрш, что будет являться потенциально опасным для ихтиофауны, в связи с длительной техногенной седиментацией осадков.

Анализ уровня загрязнения р. Толыч свидетельствует, что на структуру рыбного сообщества нижнего течения исследуемой реки влияет не только физико-химическое загрязнение, но и разнообразие среды обитания в местах отбора проб. Качество воды, оцененное по биотическому индексу IBI, показало низкое и очень низкое качество воды в нижнем течении исследуемой реки, что свидетельствовало о деградации биоты на нижних трофических уровнях зоопланктона и макрозообентоса (Ushakova et al., 2023).

Деградированная экосистема таких рек как Чёрная и Толыч может быть восстановлена в результате проведения природоохранных мероприятий, таких как снижение или предотвращение сброса неочищенных и недостаточно очищенных промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, рекультивация прибрежной полосы, создание в русле условий для обитания водных беспозвоночных и рыб (устройство быстротоков, укрытий, удаление иловых отложений, внесение жестких грунтов и т.д.), мероприятий по искусственному воспроизводству рыб. Также требуется рациональный подход к утилизации иловых отложений с чрезвычайно опасной категорией загрязнения по содержанию металлов, поскольку традиционное изъятие загрязненного грунта и размещение его в местах складирования и утилизации ближайших ТКО только увеличит нагрузку на действующие полигоны (Ушакова и др., 2022). Направлением восстановления этих объектов является ремедиация загрязненных илов, грунтов и почв на специализированных полигонах с целью их вторичного использования или ремедиации *in situ*, без организации выемки и вывоза на полигоны (Ушакова и др., 2022).

Для оперативного контроля уровня загрязнения и экологического благополучия Камского водохранилища необходим территориальный мониторинг малых рек, находящихся длительное

время в условиях повышенной техногенной нагрузки. Наиболее эффективная оценка экологического состояния бассейнов малых рек реализуется с применением бассейнового подхода, основанного на оценке загрязнения поверхностных вод и донных отложений в пределах их водосборных площадей.

С учетом того, что водные объекты включают в себя несколько компонентов (поверхностные воды, донные отложения и биота), необходим анализ состояния всей водной экосистемы. Как показали результаты исследования в бассейне р. Толыч, оценка качества поверхностных вод только по физико-химическим параметрам не является достаточно информативной для адекватной оценки состояния водной экосистемы. Апробация комплексного использования абиотических и биотических показателей для оценки экологического состояния малых рек, находящихся в условиях повышенного техногенного воздействия, на примере р. Толыч, где отмечен высокий уровень загрязнения токсичными микроэлементами донных отложений (по Igeo, Zc, RI, PECQ) и низкое качество вод по биотическим (Вудивисса, Гуднайта-Уитли) и мультиметрическим (индекс Карра) индексам, продемонстрировала информативность и эффективность такого подхода.

При проведении и организации экологического мониторинга водных объектов, находящихся в условиях длительного и интенсивного загрязнения, использование биотического компонента позволяет оценить влияние загрязнения и на биоразнообразие, эта информация может выступить основой мероприятий с целью сохранения биоразнообразия и его прогнозирования в уязвимых экосистемах. К тому же, использование биоиндикационных методов при экологическом мониторинге водных объектов не требует дорогостоящего оборудования с высокими затратами на исследования, что выгодно отличает её от оценки качества вод по физико-химическим параметрам (Nawrot et al., 2021).

Донные отложения малых рек, аккумулируя загрязнение, поступающее со сбросами сточных вод и диффузным загрязнением, являются показательными составляющими в системе оценки долгосрочного воздействия на водоём, имеют важное значение в биогеохимической системе «вода ↔ донные отложения ↔ гидробионты». Анализ химического состава донных отложений служит индикатором степени и масштаба загрязнения водотоков, отражая экологическое состояние водосборных площадей. Гидробионты, для которых донные отложения выступают средой обитания, являются высокочувствительным инструментом для адекватной оценки изменения качества речных вод и донных отложений при загрязнении водоемов.

В связи с тем, что высокий уровень техногенной нагрузки в верхней части Камского водохранилища связан с разными источниками поступления микроэлементов в акваторию малых рек на этом участке (рисунок 5.6.1), рекомендуется включить в программу территориального мониторинга водных объектов малые реки в верхней части Камского водохранилища – прежде

всего р. Толыч и р. Усолку, а также р. Чёрную, где наблюдается сложная водохозяйственная обстановка. В настоящее время нижнее течение р. Чёрной разделено на две части: старое русло, по которому до 2017 г. происходил сброс сточных вод и в устье сформировалась значительная толща техногенных осадков, представляющих угрозу вторичного загрязнения акватории Камского водохранилища, а также современное русло, представленное искусственным каналом по транспортировке сточных вод со сбросом в Камское водохранилище через очистные сооружения механической очистки. Эти исследования можно рассматривать как часть программы по реабилитации р. Камы (<https://kambvu.ru>).

Для понимания формирования химического состава водных объектов, разработки мероприятий по снижению загрязнения, необходима комплексная экологическая оценка их водосборных бассейнов с анализом его структуры, источников поступления загрязняющих веществ, функционального использования земель, включая оценку эколого-геохимический обстановки. Оценка качества воды и донных отложений должна производиться по стандартному перечню показателей с учетом специфики загрязнения территории, а методы оценки включать геохимические, санитарно-гигиенические и комплексные показатели загрязнения, с обязательным включением гидробиологических исследований.

Анализ таких гидрологических параметров как длина реки, площадь водосбора, уклон, залесенность, глубина водотока, расход воды, влияющие на скорость разбавления стоков, в целом позволит оценить степень самоочищения малых рек в условиях повышенной техногенной нагрузки и понять причины экологического неблагополучия водоема (Юрова, 2022; Алексеевнина и др., 2016). Так при поступлении сточных вод в малые реки на территории Соликамско-Березниковской агломерации вынос загрязняющих веществ, в том числе токсичных микроэлементов в Камское водохранилище, происходит неравномерно в течение года в период весеннего паводка и межени (Лепихин и др., 1999).

Как правило экологическое состояние водоемов в рамках региональных программ мониторинга оценивается по физическим и химическим свойствам от 30 до 48 показателей для речных вод, качество донных отложений – преимущественно по токсичным металлам, нефтепродуктам, бенз(а)пирену и с характеристикой ионного состава водных вытяжек, также выполняются гидробиологические исследования по индикаторным группам организмов. В связи с тем, что финансирование таких работ происходит через государственные структуры на конкурсной основе, необходимо соблюдение выполнения комплексной оценки состояния водных объектов (малых рек), что должно учитываться в технических заданиях на такие работы.

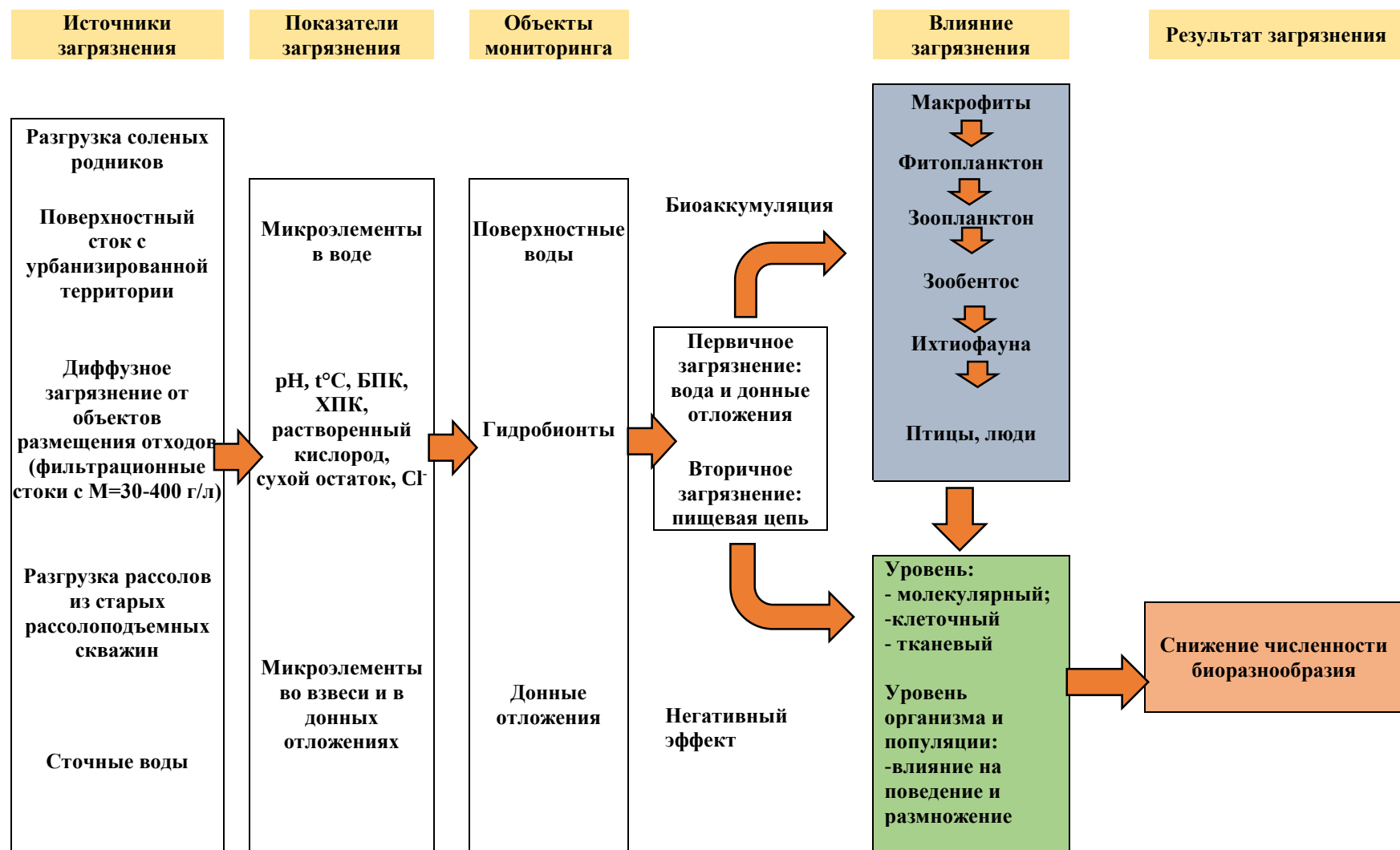


Рисунок 5.6.1 – Блок-схема процессов распределения загрязнения в малых реках Соликамско-Березниковской агломерации

При этом химико-аналитические исследования загрязняющих веществ при репрезентативном мониторинге составляет значительную часть расходов. В большинстве случаев территориальный и региональный мониторинг в субъектах Российской Федерации выполняются в недостаточном объеме. Поэтому каждый исследователь или специалист в природоохранной области должен ориентироваться в рыночной стоимости выполнения химико-аналитических исследований, учитывать методы выполнения анализа и их чувствительность с необходимым диапазоном массовых долей анализируемых элементов и соединений, определяемых конкретным методом (Ладонин, 2019). При организации мониторинга малых рек в их нижнем течении на территории Соликамско-Березниковской агломерации рекомендуется использовать приведенный в таблице 5.6.1 перечень определяемых компонентов. При этом необходимо учитывать специфические элементы-индикаторы на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей: среди основных анионов – Cl^- , Br^- , а катионов – Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , и связанные с ними талассофильные элементы – Rb, Sr, Li, Cs, Tl, связанные соленосными отложениями, среди микроэлементов – Co, Cr, As, Ti, V, Ni, Cu и др., связанные с терригенными отложениями, вмещающими соли (Экологический мониторинг..., 2022; Хайрулина, 2022).

Таблица 5.6.1 – Перечень определяемых компонентов при организации мониторинга водных объектов на территории Соликамско-Березниковской агломерации

	Показатели оценивания:	
	<i>Российские</i>	<i>Зарубежные</i>
Речные воды: <i>Гидрологические:</i> Расход воды, Скорость течения, Уровень воды, <i>Гидрохимические:</i> Физические: органолептические свойства, температура, pH. Химические: сухой остаток, макро- и микрокомпоненты, растворенный кислород, БПК ₅ , ХПК, нефтепродукты, бенз(а)пирен, взвешенные вещества	ПДК _{рх} ИЗВ	ERI HEI
Донные отложения: <i>Физические:</i> цвет, запах, консистенция, тип, включения, температура, pH. <i>Химические:</i> микроэлементы, основные катионы и анионы, нефтепродукты, бенз(а)пирен	Zc ПДК (для почв) КДА	Igeo PECQ RI
Гидробионты: <i>Ихтиофауна</i> <i>Зообентос</i>	Индекс Гуднайта-Уитлея Индекс Вудивисса Индекс Кинга и Болла Индекс Карра	

На современном этапе существуют следующие надежные и высокочувствительные методы для определения микроэлементного состава вод, донных отложений, почв и грунтов: атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС); масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) и оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС), а также рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Многие исследователи отдают предпочтение методу ИСП-МС в связи с возможностью определения большого числа элементов с концентрациями в диапазоне от нескольких мг/кг до долей мкг/кг. Такие низкие пределы обнаружения необходимы для определения фоновых концентраций микроэлементов, преимуществом является и низкая стоимость анализа относительно других методов (Эпов, 2000; Глазунов и др., 2008; Базыкова и др., 2010). При этом исследователи относят ИСП-МС к прецизионным методам, позволяющим достичь высокий уровень воспроизводимости и точности анализа природных материалов, решая задачи фундаментальных и прикладных геологических, биологических и экологических исследований (Светов и др., 2023).

Традиционно загрязнение микроэлементами поверхностных вод и донных отложений оценивается на основании геохимического подхода, когда проводится сравнение загрязнения с условным фоном или нормирование данных наблюдений относительно среднемировых концентраций микроэлементов или кларков верхней континентальной коры. Также используют санитарно-гигиенические подходы нормирования качества воды по ПДК_{рх}, ввиду того, что малые реки имеют важное рыбохозяйственное значение при заходе ихтиофауны на нерест и нагула молоди из крупных водных объектов. Альтернативой при отсутствии нормативов для донных отложений в РФ является использование ПДК для тяжелых металлов в почве (СП 502.1325800.2021). Использование интегральной оценки загрязнения токсичными микроэлементами водных объектов, таких как ИЗВ, HEI и ERI в поверхностных водах, Zc, RI и PECQ – в донных отложениях, позволяет осуществить комплексную оценку загрязнения по степени их накопления, уровню загрязнения и воздействию на гидробионты.

В настоящее время в России индекс загрязнения воды (ИЗВ) и удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) являются наиболее распространенными комплексными показателями качества воды, которые официально регламентированы при проведении мониторинга поверхностных вод (РД 52.24.643-2002 и Методические..., 1988), в зарубежных странах успешно используется показатель качества воды (Water Quality Index, WQI) с различными многочисленными модификациями (CCME, NSF, FIS, MWQI, Horton и т.д.) с учетом разных геоморфологических и климатических характеристик водосборных территорий (Chidiac et al., 2023). При этом имеются не менее информативные комплексные показатели качества воды такие как комбинаторный индекс загрязнённости воды (КИЗВ), коэффициент

комплексности загрязнённости (К), комплексная оценка степени загрязнения водных объектов токсичными веществами (КОСЗ), индекс Iwq (Некрасова и др., 2013; Кобзев и др., 2019).

Результаты сравнения ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI, свидетельствует о преимуществах и недостатках трех рассмотренных индексов. Так УКИЗВ и CCME WQI за счет большего количества гидрохимических параметров дают более точные результаты оценка качества воды в отличие от ИЗВ, который за счет простоты расчета сильно искажает оценку загрязненности вод из-за ограниченного числа используемых параметров. При этом CCME WQI не имеет жестких параметров при использовании нормативных значений, имеет стобалльную систему оценки загрязнения, наглядно отражая адекватный уровень загрязнения вод (Белякова и др., 2021).

Во многих промышленно развитых странах для определения экологического статуса водных объектов в качестве биологического индикатора используют донных беспозвоночных и ихтиофауну. По результатам расчетов биотических и мультиметрических индексов только половина оцениваемых участков в Европе, Азии, Северной и Южной Америки, включая Океанию находились в хорошем биологическом состоянии, а почти треть – в состоянии с серьезными нарушениями (Feio et al., 2022; López-López et al., 2015).

На основании нормативных документов и результатов настоящего исследования индикаторами загрязнения донных отложений и, как следствие, качества водоема являются донные беспозвоночные (зообентос). Использование данных по состоянию ихтиофауны для водных объектов рыбохозяйственного значения является необходимым направлением для оценки среды обитания водных биоресурсов, контроля качества рыбной продукции и мониторинга состояния водной среды. Выбор оптимальных биотических показателей в рамках территориального мониторинга водных объектов на территории Верхнекамского месторождения солей, отражающих достоверность, простоту применения и высокую чувствительность к техногенному загрязнению, позволит повысить информативность оценки качества вод. Анализ результатов биологического контроля необходимо проводить с их интерпретацией с другими данными, которые позволят перевести научные данные в управленческие решения по водному объекту (Семенченко и др., 2010).

На сегодняшний день существует большое количество биотических индексов, многомерных методов и мультиметрических индексов для оценки состояния рек с использованием макрозообентоса и ихтиофауны. Из них наиболее часто используемыми являются биотические индексы, необходимые для экспресс-оценки состояния воды, а рекомендуемыми – мультиметрические индексы, позволяющие учитывать большое количество данных для выявления причины деградации (Fierro et al., 2017; Zakaria et al., 2019).

В практике биологического мониторинга существует более 15 биотических индексов с многочисленными модификациями для разных типов водоемов. В научно-исследовательской

практике в странах ЕС, США, Латинской Америки широко применяются 2-3 индекса, которые позволяют легко сопоставлять результаты абиотических и биотических индексов для конкретного водоема (Головатюк и др., 2020). В России гидробиологические исследования выполняются на основании использования биоиндикационных исследований по макрозообентосу с использованием биотического индекса Вудивиса и олигохетного индекса Гуднайта–Уитли, рекомендованных руководящими документами Росгидромета для организации и проведения наблюдений за загрязнением поверхностных водных объектов (рисунок 5.6.2).

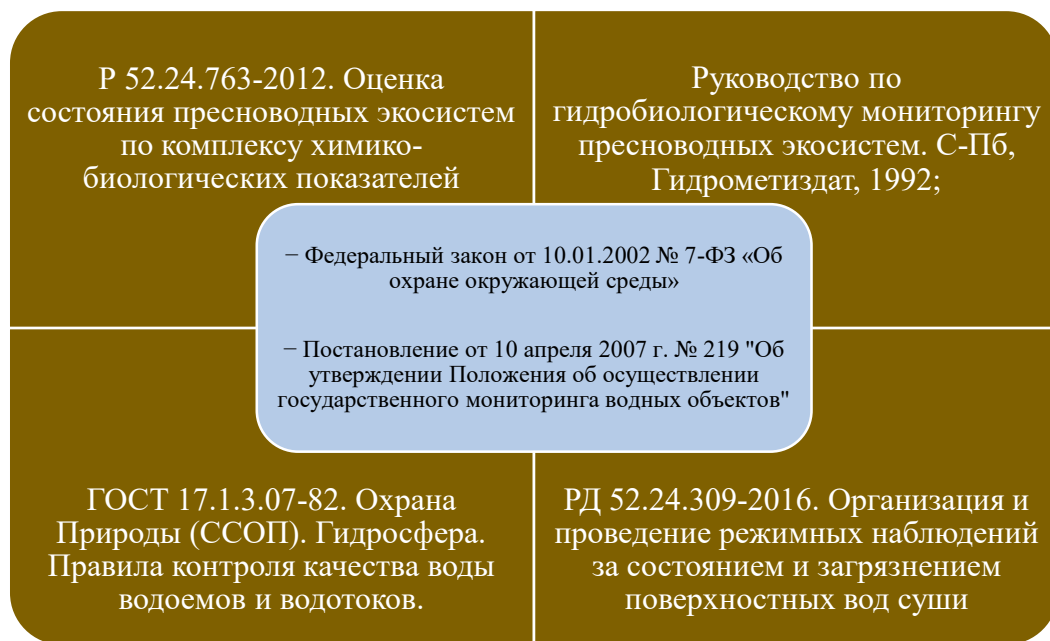


Рисунок 5.6.2 – Документы, регламентирующие проведение работ по контролю качества вод по гидробиологическим показателям

Поэтому для более достоверной оценки состояния малых рек в условиях интенсивного техногенного воздействия помимо интегральной оценки загрязнения речных вод и донных отложений в рамках мониторинга к программам наблюдений и контроля следует рекомендовать оценку состояния их водных экосистем методами биологической индикации по результатам индексов Гуднайта-Уитли, Вудивисса, Кинга и Болла и мультиметрического индекса Карра.

Таким образом, в данном исследовании определены методы оценки состояния малых рек Соликамско-Березниковской агломерации с учетом перечня загрязняющих веществ и показателей, позволяющие наиболее эффективно оценить экологическое состояние водных объектов в условиях повышенной техногенной нагрузки. Полученные результаты оценки загрязнения водных объектов этой территории по абиотическим и биотическим показателям подтверждают необходимость принятия управленческих мер по сохранению или восстановлению биоразнообразия и экосистемных функций, оптимизации территориального

мониторинга водных объектов (малых рек) с целью предупреждения и прогнозирования загрязнения Камского водохранилища. Результаты проведенных исследований позволили обосновать и рекомендовать дополнения к территориальному мониторингу наблюдений нижнего течения рек Усолка, Чёрная и Толыч по абиотическим и биотическим показателям оценивания, поскольку сток исследуемых малых рек осуществляет транзит микроэлементов со всей площади водосбора в устьевую часть, оказывая воздействие на формирование экологического состояния на этом участке акватории Камского водохранилища.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам эколого-геохимической оценки малых рек Соликамско-Березниковской агломерации установлено, что их воды относятся к хлоридно-гидрокарбонатному натриево-кальциевому солоноватому типу. Состав вод исследуемых рек определяют ионы Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , с которыми связано повышение уровня минерализации, засоление определяет рост содержаний Cr, As, Cu, Ni и Cd. Преобладание в ионном составе речных вод хлорид-ионов, ионов кальция и натрия, наличие сильной положительной корреляции между ними характерно для природных вод в пределах Верхнекамского месторождения солей и обусловлено геолого-гидрогеологическими условиями территории.

Анализ структуры речных бассейнов по хозяйственному использованию земель в пределах их водосборных бассейнов выявил, что реки Усолка и Зырянка, имеющие большие площади водосборов (до 506 км²) с незначительной долей площадей, занятых промышленными предприятиями и городской застройкой, характеризуются более благоприятным экологическим состоянием. Бассейны рек Толыч и Чёрной характеризуются существенным преобразованием территории водосборов с размещением здесь промышленных объектов и городской застройки (47% и 46% территории, соответственно), что снижает поступление естественного поверхностного стока в реки.

На территории исследования формирование химического состава речных вод в значительной степени осуществляется за счет техногенного стока, который оказывает наиболее существенное влияние на экологическое состояние рек с малыми водосборами (до 36 км²). Наихудшее качество поверхностных вод среди исследованных объектов выявлено в р. Чёрной, а наихудшее качество донных отложений – в р. Толыч. Основными элементами-загрязнителями в водах р. Чёрной, которое наиболее существенно проявлялось в период опробования в нижнем течении (данные по показателям HEI, ERI, ИЗВ), являются Cr, Ni, Zn, Cu и As.

Высокий уровень загрязнения микроэлементами донных отложений р. Толыч обусловлен комплексом техногенных факторов. С учетом различных точечных и диффузных источников загрязнения в пределах водосбора реки наблюдается интенсивная аккумуляция в осадках элементов в следующем порядке $\text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As}$, трансформация химического состава водной вытяжки от $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ к $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ и $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$. Апробация методики расчета значений вероятности биологического воздействия PECQ для донных отложений р. Толыч свидетельствует о различной степени токсического риска за счет высоких концентраций Hg, Ni, Cd для бентических организмов (от средней до сильной).

Полученные результаты в бассейне р. Толыч свидетельствуют о синергетическом информационном эффекте при использовании абиотических и биотических подходов при эколого-геохимической оценке таких объектов. Рассчитанные биотические индексы для

макрозообентоса и мультиметрические для ихтиофауны р. Толыч, свидетельствующие о качестве вод, продемонстрировали эффективность их использования для комплексной оценки экологического состояния водных объектов в условиях повышенной техногенной нагрузки. Для таких техногенно-нагруженных объектов помимо стандартных методов химического анализа вод и донных отложений рекомендуется использовать методы биоиндикации и биотестирования для оперативного контроля состояния водных экосистем в рамках программ экологического мониторинга в регионе.

Оценка эколого-геохимического состояния малых рек Соликамско-Березниковской агломерации по интегральным индексам свидетельствуют, что для правильного понимания степени загрязнения микроэлементами техногенно-нагруженных водных объектов необходимо использование геохимических, санитарно-гигиенических и экотоксикологических методов. По результатам интегральных индексов загрязнения поверхностных вод и донных отложений малых рек Соликамско-Березниковской агломерации сток рек Усолка, Чёрная и Толыч следует рассматривать как источник поступления токсичных микроэлементов в акваторию Камского водохранилища на этом участке. Это подтверждается экологическим состоянием поверхностных вод и донных отложений нижнего течения этих рек (категория вод – «грязные», «чрезвычайно грязные», «умеренно загрязненные»; донные отложения – «средний уровень загрязнения», «высокий уровень загрязнения»).

Для своевременного выявления, предупреждения и прогнозирования загрязнения акватории Камского водохранилища в рамках федеральной программы по экологической реабилитации р. Камы необходим репрезентативный территориальный мониторинг малых рек в Соликамско-Березниковской агломерации. Для эффективной оценки экологического состояния в программы мониторинга этих объектов целесообразно включить не только абиотические показатели (физико-химические исследования поверхностных вод и донных отложений), но и подходы, основанные на прямом отклике водных сообществ на совокупное техногенное воздействие (исследования макрозообентоса и ихтиофауны).

Полученные результаты исследования могут быть использованы Администрациями городов Березники и Соликамска, природоохранными структурами Пермского края для развития программ мониторинга водных объектов. Разработанные подходы рекомендуются к использованию природоохранными организациями других субъектов при проведении эколого-геохимических наблюдений для решения задач прогнозирования экологической обстановки территорий с повышенным уровнем техногенного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Опубликованная литература

1. Аджиенко, Г. В. Риск-ориентированный подход в системе природоохранного регулирования: российский и международный опыт / Г. В. Аджиенко, Е. В. Веницианов // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2018. – № 2(122). – С. 4-13.
2. Алексеевнина, И. В. Санитарная гидробиология с основами водной токсикологии: учеб. пособие / М.С. Алексеевнина, И.В. Поздеев // Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – 2016. – 205 с.
3. Андрианова, А. В. Биотические индексы и метрики зообентоса в оценке экологического состояния крупной реки смешанного типа / А. В. Андрианова, Ю. В. Шанько // Экология. – 2022. – № 2. – С. 145-152.
4. Андрианова, А. В. Биотические индексы и метрики в оценке качества воды малых рек на территории природного парка "Ергаки" (юг Красноярского края) / А. В. Андрианова // Сибирский экологический журнал. – 2015. – Т. 22, № 3. – С. 439-451.
5. Базыкова, О. И. Определение содержания тяжелых металлов в пробах природных вод, снега и почв методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой / О.И. Базыкова, А.Л. Глазунов, Н.А. Грановская, Р.Е. Кузин // Цветные металлы. – 2010. – № 1. – С. 40-44.
6. Барях, А. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А. А. Барях, А. Е. Красноштейн, И. А. Санфиров // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2013. – № 2. – Р. 40-49.
7. Бачурин, Б. А. Геохимическая трансформация отходов калийного производства в условиях гипергенеза / Б. А. Бачурин, А. Ф. Сметанников, Е. С. Хохрякова // В сборнике: Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. Материалы Международной научной конференции, посвящённой 110-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашёва (1907-1987). – 2017. – С. 54-57.
8. Бачурин, Б. А. Технологическая экогеохимия горного производства / Б. А. Бачурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 8. – С. 148-153.
9. Бачурин, Б. А. Экологические проблемы горнопромышленных районов Пермского края / Б. А. Бачурин // Экология и промышленность России, 2006. – Апрель. – С. 32-35.
10. Баяндина, Э. О. Исследование геологических условий и результатов истираний керна сильвинитов при разведке Верхнекамского месторождения: специальность 25.00.11 "Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Баяндина Элиза Олеговна, 2018. – 317 с.

11. Безматерных, Д. М. Перспективы совершенствования технологии экологического мониторинга поверхностных вод Обь-Иртышского бассейна / Д. М. Безматерных, А. В. Пузанов, Т. С. Папина [и др.] // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2020. – № 2(57). – С. 49-58.
12. Безматерных, Д. М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири / Д. М. Безматерных // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2007. – № 85. – С. 1-86.
13. Белкин, П. А. Химический состав родникового стока в районе складирования отходов разработки и обогащения калийных солей / П. А. Белкин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2020. – Т. 19, № 3. – С. 232-240.
14. Белкин, П. А. Трансформация химического состава подземных вод в зоне влияния объектов складирования разработки калийных солей (на примере Верхнекамского месторождения): дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.36 / Белкин Павел Андреевич. – Москва, 2019. – 117 с.
15. Белкин, П. А. Закономерности техногенной трансформации химического состава подземных вод в районах разработки калийных месторождений / П. А. Белкин, В. Н. Катаев // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 2(50). – С. 55-64.
16. Белкин, П. А. Характеристика техногенной трансформации химического состава родникового стока в районе добычи солей на примере Верхнекамского месторождения / П. А. Белкин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 297-306.
17. Бельтюков, Г. В. Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах: дис. ... д-ра геол.мин. наук: 04.00.01/ Бельтюков Герман Всеволодович. – Пермь, 2000. – 337 с.
18. Бельтюков, Г. В. Основные источники загрязнения подземных и поверхностных вод на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Г. В. Бельтюков // Вестник Пермского университета. – 1996. – № 4. – С. 128-140.
19. Белякова, А. М. Оценка качества воды городской реки по гидрохимическим индексам (река Охта, Санкт-Петербург) / А. М. Белякова, Н. В. Зуева // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 9. – С. 72-84.
20. Блинов, С. М. Использование отходов предприятий Пермского края / С. М. Блинов, Е. А. Меньшикова // Вестник Пермского университета. Геология. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 179-191.
21. Блинов, С. М. Основы применения геохимических барьеров для охраны окружающей среды: специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Блинов Сергей Михайлович. – Пермь, 2000. – 160 с.

22. Богданов, М. В. История солеварения Соликамска / М.В. Богданов // Соликамск: ООО «Типограф», 2014. – 272 с.
23. Богомолов, А. В. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники / А. В. Богомолов, А. П. Лепихин, Ю. С. Ляхин, М. Г. Гребенева // Горное эхо. – 2021. – № 4(85). – С. 3-11.
24. Борзаковский, Б. А. Процессы выщелачивания солей при затоплении рудника БКПРУ-1 / Б. А. Борзаковский, А. В. Шилов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 9. – Р. 136-143.
25. Борисов, А. А. Оценка стратификации водных масс в условиях нестабильного гидрологического режима / А. А. Борисов, Н. А. Голдобин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 3. – С. 62-74.
26. Ваганова, Е. С. Оценка самоочищения водных экосистем от тяжелых металлов (на примере малых рек Ульяновской области) / Е. С. Ваганова, О. А. Давыдова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 5-2. – С. 147-150.
27. Валиев, В. С. Метод комплексной оценки загрязненности донных отложений / В. С. Валиев, Д. В. Иванов, Р. Р. Шагидуллин // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2019. – № 9. – С. 51-59.
28. Веницианов, Е. В. Оценка состояния качества воды системы водохранилищ - источников питьевого водоснабжения Москвы - по многолетней динамике гидрохимических параметров / Е. В. Веницианов, Н. В. Кирпичникова // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 8. – С. 67-76.
29. Веницианов, Е. В. Основные положения концепции по ограничению диффузного стока с водосборов водных объектов бассейна Волги в рамках Федерального проекта «Оздоровление Волги» / Е. В. Веницианов // Проблемы экологии Волжского бассейна: Труды 4-й всероссийской научной конференции, Нижний Новгород, 30–31 октября 2019 года. Том Выпуск 2. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2019. – С. 3.
30. Веницианов, Е. В. Современные проблемы управления качеством поверхностных вод / Е. В. Веницианов, Г. В. Аджиенко // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. – 2019. – № 85(88). – С. 7-16.
31. Веницианов, Е. В. Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод / Е. В. Веницианов, Г. В. Аджиенко, А. А. Возняк, М. А. Чиганова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 1. – С. 47-59.

32. Веницианов, Е. В. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжелых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы / Е. В. Веницианов, С. А. Мирошниченко, А. П. Лепихин, Т. Н. Губернаторова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2015. – № 3. – С. 50-64.
33. Воронов, А. А. Совершенствование рациональных городских инженерных систем очистки поверхностных сточных вод / А. А. Воронов, Е. С. Малышкина, Е. И. Вялкова, С. В. Максимова // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т.8, № 3. – С. 43-50.
34. Ворончихина, Е. А. Технофильные металлы в естественных и урбанизированных экосистемах Пермского края / Е. А. Ворончихина, С. М. Блинов, Е. А. Меньшикова // Экология урбанизированных территорий. – 2013. – № 1. – С. 103-108.
35. Ворончихина, Е. А. Геохимия ландшафта: учеб. пособие по спецкурсу / Е. А. Ворончихина, Е. С. Ушакова. – Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2012. – 139 с.
36. Возняк, А. А. Оценка диффузного стока загрязняющих веществ в бассейне Камского водохранилища в районе Соликамско-Березниковского промышленного узла / А. А. Возняк, А. П. Лепихин // Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Сочи, 23–29 сентября 2019 года. – Сочи: ООО "Лик", 2019. – С. 461-468.
37. Гилева, Т. А. Характеристика периферической крови и содержания тяжёлых металлов в органах и тканях окуня водоёмов бассейна р. Камы / Т. А. Гилева, Н. В. Костицына // Теоретическая и прикладная экология. – 2014. – № 2. – С. 46-51.
38. Глазунов, А. Л. Масс-спектрометрические исследования химического состава образцов окружающей среды Эльконского урановорудного района / А. Л. Глазунов, Н. А. Грановская, К. Ю. Колыбанов, Р. Е. Кузин // Масс-спектрометрия. – 2008. – Т. 5, № 4. – С. 267-274.
39. Головатюк, Л. В. Биотические идентификаторы в оценке качества воды эталонной реки: сравнительный анализ биоиндикационных индексов реки Байтуган (Высокое Заволжье) / Л. В. Головатюк., Т. Д. Зинченко // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2020. – Т. 162, кн. 1. – С. 134-150.
40. Гончаров, А. В. Биологическая индикация при оценке состояния (загрязнения) водных объектов / А. В. Гончаров // Инженерно-экологические изыскания - нормативно-правовая база, современные методы и оборудование: материалы Общероссийской научно-практической конференции, Москва, 14–15 сентября 2020 года. – Москва: Геомаркетинг, 2020. – С. 138-142.

41. Горбунова, К. А. Техногенное воздействие на геологическую среду Пермской области / К. А. Горбунова, Н. Г. Максимович, В. Н. Андрейчук. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990.
42. Гордеев, В. В. Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер / В. В. Гордеев, А. П. Лисицын // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 5-6. – С. 721-744.
43. Григорьев, Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры / Н. А. Григорьев. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. – 382 с.
44. Давлетов, И. И. Оценка современного состояния рыболовства и направления развития рыбоводства в Пермском крае / И. И. Давлетов // Московский экономический журнал. – 2019. – № 8. – С. 86.
45. Данилов-Данильян, В. И. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохранных программ / В. И. Данилов-Данильян, В. О. Полянин, Т. Б. Фашевская, Н. В. Кирпичникова, М. А. Козлова, Е. В. Веницианов // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 503-514.
46. Данилов-Данильян, В. И. Оценка современных подходов к управлению качеством поверхностных вод и их охране / В. И. Данилов-Данильян, Е. В. Веницианов, Г. В. Аджиенко, М. А. Козлова // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 12. – С. 1248-1259.
47. Даувальтер, В. А. Геоэкология донных отложений озер / В. А. Даувальтер. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. – 242 с.
48. Ежова, А. В. Литология. Краткий курс: учебное пособие / А. В. Ежова // Томск: Томский политехнический университет, 2014. – 102 с.
49. Зайкова, Е. А. Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами / Е. Ю. Зайкова, С. С. Феофанова // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, №. 11. – С. 1429-1452.
50. Закруткин, В. Е. Донные отложения рек техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: сравнительная оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами по отечественным и зарубежным критериям / В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, О.С. Решетняк, Е.В. Гибков // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 554-564.
51. Закруткин, В. Е. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса / В. Е. Закруткин, Е. В. Гибков, О. С. Решетняк, В. Н. Решетняк // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2020. – № 2. – С. 259-271.
52. Засыпкин, П. Д. Комплексный подход к оценке экологического благополучия водных экосистем / П. Д. Засыпкин, О. С. Ушакова, Г. А. Оболдина, Т. Е. Павлюк // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 5. – С. 86-100.

53. Зиновьев, Е. А. Характеристика современного состояния водной экосистемы верхней части Камского водохранилища / Е. А. Зиновьев, С.А. Двинских, А.Б. Китаев // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 50-63.
54. Зиновьев, Е. А. Роль химического загрязнения в формировании и особенностях ихтиофауны Камского водохранилища в районе Соликамско-Березниковского промышленного комплекса / Е. А. Зиновьев, А. Б. Китаев // Географический вестник. – 2011. – № 2 (17). – С. 59-65.
55. Зубарев, В. А. Анализ тяжелых металлов донных отложений малых рек, подверженных влиянию сельскохозяйственной мелиорации, на территории Среднеамурской низменности / В. А. Зубарев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2014. – Т 324, № 1. – С. 203-208.
56. Зыков, И. Е. Сравнительный анализ биотических индексов оценки качества воды реки Большая Дубна восточного Подмосковья / И. Е. Зыков, Д. Е. Ваулин // Экологический вестник. – 2015. – № 4. – С. 121-125.
57. Иванов, В. В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн./ Под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Экология, 1997. – Кн. 5: Редкие d-элементы. – 576 с.
58. Иванов, Д. В. Апробация методики оценки уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами и нефтепродуктами с использованием региональных нормативов их фонового содержания / Д. В. Иванов, В. С. Валиев, Д. Е. Шамаев // Российский журнал прикладной экологии. – 2020. – № 3.– С. 40-45.
59. Ивичева, К. Н. Анализ влияния освоенности речных бассейнов на качество вод методами ГИС / К. Н. Ивичева, И. В. Филоненко // Принципы экологии: научный электронный журнал. – 2012. – № 2. – С. 77-82.
60. Казаринов, С. Н. Видовой состав и особенности распределения ихтиофауны Камского водохранилища / С. Н. Казаринов, И. Н. Мерзляков, С. В. Поносов, Л. В. Комарова // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2021. – № 1. – С. 39-52.
61. Калинина, Т. А. Геохимия терригенно-карбонатных и сульфатных пород соликамской свиты Соликамской впадины / Т. А. Калинина, Е. П. Чиркова, И. И. Чайковский // Вестник Пермского университета. Геология. – 2016. – Т. 1, № 30. – С. 347-355.
62. Калинкина, Н. М. Биоиндикация загрязнения вод и донных отложений в Кондопожской губе Онежского озера / Н. М. Калинкина, Т. П. Куликова, И. А. Литвинова [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2011. – № 3. – С. 265-274.

63. Касимов, Н. С. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии / Н. С. Касимов, Д. В. Власов // Вестник Московского университета. Серия. 5. География. – 2015. – № 2. – С. 7-17.
64. Касимов, Н. С. Экогеохимия ландшафтов / Н. С. Касимов; Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет. – Москва: ИП Филимонов М.В., 2013. – 208 с.
65. Кашулин, Н. А. Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии / Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, Д. Б. Денисов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, № 9-6. – С. 34-86.
66. Ким, А. Н. Очистка поверхностного стока с урбанизированных территорий на локальных пассивных системах / А. Н. Ким, А. В. Михайлов // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 4(72). – С. 40-52.
67. Кирпичникова, Н. В. Критерии оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Иваньковское водохранилище / Н. В. Кирпичникова, В. О. Полянин, И. Е. Курбатова, Ю. Д. Черненко // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 6. – С. 81-105.
68. Князев, В. В. Экологические аспекты совместного размещения твердых галитовых отходов и глинисто-солевых шламов / В. В. Князев, Ю. А. Комаров // Горный журнал. – 2016. – №4. – С. 97-101.
69. Кобзев, А. В. О комплексных показателях оценки качества природных вод по гидрохимическим показателям / А. В. Кобзев, М. Р. Ерофеева // Труды БрГУ. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т.1. – С. 224-230.
70. Комлев, А. М. Реки Пермского края: монография / А.М. Комлев. Перм.гос.ун-т – Пермь: ООО «Алекс-Пресс», 2011. – 144 с.
71. Копылов, И. С. Линеаментно-блоковый анализ, блоковое строение и карта неотектонических блоковых структур Пермского Приуралья и Урала / И. С. Копылов // Аэрокосмические методы в геологии: Сборник научных статей IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 07 декабря 2021 года / Под общей редакцией И. С. Копылова. Том Выпуск 4. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – С. 11-29.
72. Копылов, И. С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края / И. С. Копылов. – Пермь: Издательский центр Пермского государственного национального исследовательского университета, 2021. – 501 с.

73. Кораблина, И. В. Тяжелые металлы и мышьяк в воде, донных осадках и калкане (*Scophthalmus macoticus*, Pall., 1814) в районах Кавказского шельфа Черного моря (1995-2020 гг.) / И. В. Кораблина, Ж. В. Геворкян, Л. Г. Горгола, Т. О. Барабашин // Водные биоресурсы и среда обитания. – 2022. – Т. 5, № 1. – С. 68-88.
74. Корженевский, Б. И. Особенности загрязнения донных отложений малых рек тяжелыми металлами в результате различной хозяйственной деятельности / Б.И. Корженевский, Г.Ю. Толкачев, Н.В. Коломийцев, Т.А. Ильина. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 3. – 415-426.
75. Косинова, И. И. Методологические особенности оценки экологического состояния донных отложений искусственно созданных водных объектов / И. И. Косинова, Т. В. Соколова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 3. – С. 113-121.
76. Копчик, Г. Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) / Г.Н. Копчик // Почвоведение. – 2014. – № 7. – С. 851–868.
77. Красильникова, С. А. Мировой опыт использования отходов производства соды / С. А. Красильникова, С. М. Блинов, П. А. Красильников, П. А. Белкин // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 12. – С. 48-53.
78. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей / А. И. Кудряшов. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.
79. Кузнецов, В. А. Геохимия речных долин (научные и прикладные аспекты исследований) / В.А. Кузнецов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 303 с.
80. Кутявина, Т. И. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) / Т. И. Кутявина, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 2. – С. 13-21.
81. Ладонин, Д. В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах / Д.В. Ладонин. М.: Издательство Московского университета, 2019. – 312 с.
82. Лепихин, А. П. Обеспечение устойчивого водопользования в условиях плотностной стратификации водных объектов / А. П. Лепихин, Т. П. Любимова, А. В. Богомолов [и др.] // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием: в 3 т., Барнаул, 29 августа – 03 сентября 2022 года. Том 1. – Барнаул: ООО "Пять плюс", 2022. – С. 179-184.
83. Лепихин, А. П. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки /

А. П. Лепихин, Е. В. Веницианов, Т. П. Любимова, А. А. Тиунов, Я. Н. Паршакова, Ю. С. Ляхин, А. В. Богомолов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 53-63.

84. Лепихин, А. П. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамско-Березниковского промузла / А. П. Лепихин, А. А. Возняк, Т. П. Любимова, Я. Н. Паршакова, Ю. С. Ляхин, А. В. Богомолов // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 560-566.

85. Лепихин, А. П. Диффузное загрязнение поверхностных водных объектов Соликамско-Березниковского промузла: масштабы, генезис / А. П. Лепихин, А. В. Богомолов, А. А. Возняк, Т. П. Любимова, Я. Н. Паршакова // Горное эхо. – 2019. – № 1(74). – С. 27-31.

86. Лепихин, А. П. Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты / А. П. Лепихин, С. А. Мирошниченко // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 92-96.

87. Лепихин, А. П. Роль донных отложений в формировании качества воды рек западного Урала / А. П. Лепихин, Н. Г. Максимович, Е. А. Меньшикова, С. А. Мирошниченко, Е. Л. Садохина // Вестник Пермского университета. Геология – 1999. – № 3. – С. 299–309.

88. Лысиков, А. Б. Влияние противогололедных реагентов на состояние почвы придорожных сосняков Серебряноборского опытного лесничества / А. Б. Лысиков // Лесоведение. – 2017. – № 6. – С. 446-451.

89. Любимова, Т. П. Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза / Т. П. Любимова, А. П. Лепихин, Я. Н. Паршакова [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 115-124.

90. Любимова, Т. П. Построение гидродинамических моделей формирования аномальных зон загрязнения в поверхностных водных объектах / Т. П. Любимова, Я. Н. Паршакова, Д. С. Голдобин, А. П. Лепихин // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2019. – № 4. – С. 26-40.

91. Лю, Юй. Моделирование влияния солеотвалов калийных комбинатов на фильтрационные свойства водовмещающих пород (на примере территории влияния 2-го соликамского калийного рудоуправления: авт. дис. ...канд. геол.-мин. наук: 25.00.07 / Лю Юй. – Москва, 2012. – 25 с.

92. Любин, П. А. Состав и структура зоопланктона как индикатора экологического состояния водной среды низовий р. Камы / П. А. Любин, И. И. Зиганшин // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9, № 1. – С. 66-75.

93. Максимова, А. М. Экологические проблемы малых водотоков / А. М. Максимова, Д. А. Нестеров // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2014. – № 165. – Р. 132-138.
94. Максимович, Н. Г. Заращение донных отложений при снижении уровня водохранилища в зоне влияния Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. Г. Максимович, Е. Г. Ефимик, О. А. Березина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 3. – С. 67-82.
95. Максимович, Н. Г. Минералы геохимических барьеров в зоне влияния отходов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. Г. Максимович, Е. А. Хайрулина // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – 2016. – № 19. – С. 324-330.
96. Максимович, Н. Г. Влияние перетоков минерализованных вод Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей на приповерхностную гидросферу / Н. Г. Максимович, М. С. Первова // Инженерные изыскания. – 2012. – № 1. – С. 22-28.
97. Максимович, Н. Г. Малые водохранилища: экология и безопасность: монография / Н. Г. Максимович, С. В. Пьянков. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. – 256 с.
98. Максимович, Н. Г. Геоэкологическое обоснование рациональной организации территории в границах осушаемого участка Нижнезырянского водохранилища / Н. Г. Максимович, Е. А. Ворончихина, И. Ю. Дылдин, В. И. Каменщикова, А. В. Сунцов // Географический вестник. – 2008. – № 2(8). – С. 230-238.
99. Максимович, Г. А. Химическая география вод и гидрогеохимия Пермской области / Г. А. Максимович, К. А. Горбунова, И. А. Печеркин, Е. А. Кротова // Пермь, 1967. – 180 с.
100. Масюткина, Е. А. Оценка экологического состояния водных объектов Калининградской области на основе структурно-функциональных и индикаторных свойств зообентоса: специальность 03.00.16: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Масюткина Елена Андреевна, 2018. – 184 с.
101. Меньшикова, Е. А. Формирование природно-технических систем горнопромышленных территорий: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение": диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Меньшикова Елена Александровна, 2022. – 375 с.
102. Меньшикова, Е. А. Трансформация аллювиальных отложений малых рек в условиях сброса сточных вод / Е.А. Меньшикова // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2016. – № 16. – С. 66-69.
103. Меньшикова, Е. А. Трансформация осадочного процесса в условиях сброса сточных вод (на примере малых рек г. Соликамска) / Е. А. Меньшикова // Эволюция осадочных

процессов в истории Земли: материалы 8-го Всероссийского литологического совещания (Москва, 27-30 октября 2015 г). – Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015- Том I. – 492 с.

104. Мингазова, Н. М. Инвентаризация и экологическая паспортизация водных объектов как способ сохранения и оптимизации их состояния / Н. М. Мингазова, О. Ю. Деревенская, О. В. Палагушкина и др. // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 2(28). – С. 37-43.

105. Мирошниченко, С. А. Современные особенности гидрохимического режима Верхне-Зырянского водохранилища - источника технического водоснабжения калийных предприятий БКПРУ-2, 4 / С. А. Мирошниченко, А. В. Богомолов, А. А. Возняк, А. П. Лепихин, Ю. С. Ляхин // Горное эхо. – 2021. – № 1(82). – С. 15-24.

106. Мирошниченко, С. А. Источники формирования железа в поверхностных водах реки Камы в пределах Пермского края / С. А. Мирошниченко // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2011. – № 6. – С. 69-82.

107. Михальчук, А. А. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Часть II. Компьютерный практикум: учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Языков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 152 с.

108. Моисеенко, Т. И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения / Т. И. Моисеенко // Геохимия. - 2019. - Т. 64. - №7. - С. 675-688.

109. Морозова, Г. Ю. Зеленая инфраструктура как фактор обеспечения устойчивого развития Хабаровска / Г. Ю. Морозова, И. Д. Дебелая // Экономика региона. – 2018. – Т. 14, вып. 2. – С. 562-574

110. Москвина, Н. В. Почвенный и растительный покров в долинах рек Толыч и Зырянка в условиях техногенного засоления / Н. В. Москвина, Н. А. Молганова, С. А. Овеснов // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27, № 7. – С. 53-59.

111. Музыченко, Т. К. Пространственный анализ землепользования в водосборе залива Петра Великого / Т. К. Музыченко // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 10. – С. 58-63.

112. Мягкая, И. Н. Экогеохимическая оценка рек Ярлы-Амры и Чибитка, расположенных в ореоле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов (Горный Алтай) / И. Н. Мягкая, Б. Ю. Сарыг-оол, И.С. Кириченко, М.А. Густайтис, Е.В. Лазарева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 4. – С. 7-26.

113. Некрасова, Ю. Н. Оценка загрязнения поверхностных вод в районе действующего объекта по уничтожению химического оружия «Марадыковский» по комплексным гидрохимическим показателям / Ю. Н. Некрасова, Е. В. Дабах // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – №2. – С. 95-101
114. Овчанкова, Н. Б. Пресноводные моллюски бассейна верхней и средней Камы: дис. ...канд.биол.наук:03.02.04 / Овчанкова Надежда Борисовна. – Пермь, 2021. – 319 с.
115. Опекунов, А. Ю. Изучение радионуклидного состава донных отложений рек Санкт-Петербурга / А. Ю. Опекунов, Д. В. Пичугина, В. И. Жеребчевский, М. Г. Опекунова // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 8. – С. 1184-1189.
116. Опекунова, М. Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири / М. Г. Опекунова, А.Ю. Опекунов, С.Ю. Кукушкин, А.Г. Ганул // Почвоведение. – 2019. – № 4. – Р. 422-439.
117. Осовецкий, Б. М. Природно-техногенные осадки / Б.М. Осовецкий, Е.А. Меньшикова // Пермь: Перм. ун-т, 2006. – 208 с.
118. Папина, Т. С. Эколого-аналитическое исследование распределения тяжелых металлов в водных экосистемах бассейна р. Обь: специальность 03.00.16 «Экология», 02.00.02 "Аналитическая химия": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук / Папина Татьяна Савельевна. – Москва, 2004. – 41 с.
119. Пасечник, Е. Ю. Состав речных вод и донных отложений малых рек в условиях антропогенной нагрузки (на примере Р. Кисловка, Г. Томск) / Е. Ю. Пасечник, О. Г. Савичев, В. А. Домаренко, Н. Г. Наливайко, О. Ю. Гончаров, Н. А. Бровченко, О. Н. Владимирова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 3. – С. 79-87.
120. Пахоруков, И. В. Свойства вторично засоленных аллювиальных почв в таежно-лесной зоне Прикамья / И. В. Пахоруков, О. З. Еремченко // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 3. – С. 76-86.
121. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. М.: Географгиз, 1961. 496 с.
122. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта. / А. И. Перельман, Н. С. Касимов // М.: Астрель-2000, 1999. – 768 с.
123. Петров, Д. С. Оценка экологического состояния малых водотоков Санкт-Петербурга по показателям зообентоса в 2019–2021 гг. / Д. С. Петров, А. М. Якушева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2022. – Т.67, № 3. – С. 529-544.
124. Полякова, Т. Н. Рекомендации по оценке состояния экосистем малых водоемов по организмам макрозообентоса / Т. Н. Полякова // Изучение водных объектов и

природнотерриториальных комплексов Карелии. – Петрозаводск: Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. – 2007. – С. 85-105.

125. Пономарев, М. В. Правовое регулирование охраны окружающей среды при обращении с отходами производства и потребления: дис. ... канд. юрид. наук. / Пономарев Михаил Вячеславович. – Москва, 2019 – 215 с.

126. Попченко, В. И. Устойчивость малощетинковых червей к химическим загрязнениям / В. И. Попченко, Т. В. Попченко // Изв. Самар. НЦ РАН. – 1999. – № 2. – С. 201-203.

127. Решетняк, В. Н. Взаимосвязь химического состава и уровня загрязненности речных вод и донных отложений рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области) / В. Н. Решетняк, В. Е. Закруткин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2022. – Т 3, № 215. – С. 91-102.

128. Решетняк, О. С. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) / О. С. Решетняк, В. Е. Закруткин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 4(192). – С. 102-109.

129. Сабанаев, Р. Н. Нагрузка ливневого стока на поверхностные воды внутригородского водотока / Р. Н. Сабанаев, О. В. Никитин, В. З. Латыпова, Д. Е. Лукоянов, Н. Ю. Степанова, О. Г. Яковлева, Р. А. Шагидуллина, А. Т. Горшкова, Р. М. Сафиуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т.19, №19. – С. 157-160.

130. Савичев, О. Г. Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири / О. Г. Савичев, Н. В. Гусева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 5. – С. 28-45.

131. Савон, Д. Ю. Снижение воздействия отходов калийной промышленности на окружающую среду / Д. Ю. Савон, С. В. Шевчук, Р. В. Шевчук // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 360-368.

132. Саэт, Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин // М.: Недра, 1990. – 319 с.

133. Сборник «Состояние и охрана окружающей среды муниципального образования «Город Березники» в 2021 году», Березники. – 2021. – 116 с.

134. Светов, С. А. Прецизионный ICP-MS анализ докембрийских горных пород: методика и оценка точности результатов / С. А. Светов, А. В. Степанова, С. В. Бурдюх и др. // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2023. – № 2. – С. 73-86.

135. Семенченко, В. П. Экологическое качество поверхностных вод / В. П. Семенченко, В. И. Разлуцкий; кол. авт. Национальная академия наук Беларуси (Минск), Национальная

академия наук Беларуси, Научно-практический центр по биоресурсам. – Минск: Беларуская наука, 2010. – 329 с.

136. Сидорова, И. Т. Становление химической промышленности в Верхнекамье на примере Березниковского химического комбината / И. Т. Сидорова // Вестник государственного университета просвещения. Серия: История и политические науки – 2010. – №2. – С.80–83.

137. Силкин, Ю. А. Особенности накопления тяжелых металлов в мягких тканях средиземноморской мидии и гигантской устрицы, выращенных в прибрежной зоне Юго-Восточного Крыма / Ю. А. Силкин, Е. Н. Силкина, М. Ю. Силкин, А. Я. Столбов, А. Ю. Силкина // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2017. – № 4. – С. 99-109.

138. Соколова, Т. В. Методика интегральной эколого-геохимической оценки донных отложений искусственно созданных водных объектов в условиях природного и техногенного воздействия: дис. ... канд. геогр. наук / Соколова Татьяна Владимировна. – Воронеж, 2015. – 154 с.

139. Солдатова, Е. А. Эколого-геохимическое состояние поверхностных и подземных вод и оценка антропогенного влияния на территории водосбора реки Ганыцзян / Е. А. Солдатова, О. Г. Савичев, Д. Чжоу, И. С. Иванова, Ц. Ли, И. Дон, Ч. Сунь // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 3. – С. 341-350.

140. Соромотин, А. В. Фоновое содержание тяжелых металлов в воде малых рек Надым-Пуровского междуречья / А. В. Соромотин, А. А. Кудрявцев, А. А. Ефимова [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. – № 2. – С. 48-55.

141. Тасейко, О. В. Региональные проблемы водопользования промышленных агломераций Сибири / О. В. Тасейко, В. В. Москвичев, Д. А. Черных // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46, № 6. – С. 638-648.

142. Тепаносян, Г. О. Интегрированный подход при определении фоновых содержаний химических элементов в почвах / Г. О. Тепаносян, О. А. Беляева, Л. В. Саакян, А. К. Сагателян // Геохимия. – 2017. – № 6. – Р. 563-570.

143. Тихомиров, О. А. Накопление тяжелых металлов в донных отложениях аквальных комплексов водохранилища сезонного регулирования стока / О. А. Тихомиров, М. В. Марков // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2009. – Т. 151, № 3. – С. 143-152.

144. Ткачев, Б. П. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы / Б. П. Ткачев, В. И. Булатов // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2002. – № 64. – С. 1-114.

145. Торопов, Л. И. Характеристика загрязнения водных ресурсов Пермского края тяжелыми металлами / Л. И. Торопов // Вестник Пермского университета. Химия. – 2013. – Т.1, № 9. – С.101-108.
146. Трапезников, Д. Е. Литология шешминских отложений Соликамской впадины / Д. Е. Трапезников // Осадочная геология Урала и прилежащих регионов: сегодня и завтра: Материалы 12 Уральского литологического совещания, Екатеринбург, 22–23 октября 2018 года. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого, 2018. – С. 350-352.
147. Трапезников, Д. Е. Галогенные отложения уфимского яруса в пределах Соликамской впадины / Д. Е. Трапезников // Литосфера. – 2018. – Т. 18. № 2. – С. 223-234.
148. Ушакова, Е. С. Проблемы экологического мониторинга малых рек на территории Пермского края / Е. С. Ушакова, П. А. Белкин // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием в 2 томах, Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2023, Т.2. – С. 159-164.
149. Ушакова, Е. С. Особенности осадкообразования и экологический статус промышленного канала сточных вод / Е. С. Ушакова, П. А. Белкин, Е. В. Дробинина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 6. – С. 75-91.
150. Ушакова, Е. С. Тяжелые металлы в речных водах Пермского края / Е. С. Ушакова, С. С. Ваганов, Е. А. Меньшикова, А.Ю. Пузик, П.А. Белкин // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2023. – № 6(43). – С. 315-321.
151. Ушакова, Е. С. Экогеохимическая и биоиндикационная оценка загрязнения малых рек города Березники / Е. С. Ушакова, П. А. Белкин, М. А. Бакланов, Е.В. Дробинина, А.Ю. Пузик // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 384-393.
152. Ушакова, Е. С. Оценка загрязнённости почв детских площадок на территории жилых районов / Е. С. Ушакова, Т. И. Караваева, А. Ю. Пузик, М. А. Волклва, П. А. Белкин // Гигиена и санитария. – 2022. – Т. 101, № 1. – С. 14-20.
153. Ушакова, Е. С. Экологический мониторинг почвенного покрова как базис экологического менеджмента урбанизированных территорий / Е. С. Ушакова, П. А. Белкин // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки: Материалы Международной молодежной научной школы, Ростов-на-Дону, 27–30 сентября 2022 года. – Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – С. 237-244.

154. Ушакова, Е. С. Особенности геоэкологического состояния почв в промышленных зонах / Е. С. Ушакова, Т. И. Караваева // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Санкт-Петербург, 31 марта – 01 апреля 2022 года. – Москва: Геоинфо, 2022. – С. 437-443.
155. Ушакова, Е. С. Донные отложения и их роль в формировании экологического состояния водоемов / Е. С. Ушакова, Е. А. Меньшикова // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2021. – № 4(41). – С. 316-321.
156. Ушакова, Е. С. Оценка микроэлементного состава снежного покрова Березниковского городского округа (Пермский край) / Е. С. Ушакова, А. Ю. Пузик, Т. И. Караваева // Географический вестник. – 2020. – № 2 (53). – С. 130-140.
157. Ушакова, Е. С. Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере Г. Березники, Пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки / Е. С. Ушакова, Т. И. Караваева, П. А. Белкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 10. – С. 58-70.
158. Ушакова, Е. С. Оценка содержания микроэлементов в донных отложениях Березниковского городского округа (Пермский край) / Е. С. Ушакова, А. Д. Перевощикова, М. А. Волкова // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2020. – № 3(40). – С. 243-251.
159. Фазлыева, А. С. Накопление кадмия в органах экспериментальных животных и его влияние на содержание эссенциальных элементов при хронической интоксикации / А. С. Фазлыева, Д. О. Каримов, Р. А. Даукаев, М. В. Курилов, М. М. Зиятдинова, Я. В. Валова, С. Р. Афонькина, Е. Е. Зеленковская // Гигиена и санитария. – 2021. – Vol. 100, № 11. – С. 1303-1309.
160. Хайрулина, Е. А. Ландшафтообразование в условиях техногенного галогенеза: дис. ... д-р геогр. наук / Хайрулина Елена Александровна. – г. Томск, 2022. – 285 с.
161. Хайрулина, Е. А. Трансформация почвенно-растительного покрова в результате влияния изливающихся древних рассолоподъёмных скважин на территории пермского края / Е. А. Хайрулина, Н. В. Митракова, Л. В. Новоселова, Н. В. Порошина // Географический вестник. – 2021. – № 4 (59). – С. 113-129.
162. Хайрулина, Е. А. Особенности формирования макрокомпонентного состава снежного покрова в крупном центре калийной промышленности г. Березники / Е. А. Хайрулина, Е. С. Ушакова // Проблемы региональной экологии. – 2020. – № 3. – С. 28-38.

163. Хайрулина, Е. А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с солесодержащими отходами на поверхностные и подземные воды / Е. А. Хайрулина // Географический вестник. – 2018. – Т.2, № 45. – С. 145-155.
164. Хайрулина, Е. А. Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Е. А. Хайрулина, Л.В. Новоселова, Н.В. Порошина // Географический вестник. – 2017. – № 1(40). – С.93-101.
165. Хайрулина, Е. А. Влияние шламохранилища с солесодержащими отходами на приповерхностную гидросферу / Е. А. Хайрулина, Н. Г. Максимович // В сборнике: Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. 2017. С. 429-434
166. Хайрулина, Е. А. Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей / Е. А. Хайрулина // Теоретическая и прикладная экология. – 2014. – № 3. – С. 41-45.
167. Чайковский, И. И. Современное минералообразование в месте разгрузки рассолов Людмилинской скважины (г. Соликамск, Пермский край) / И. И. Чайковский, О. В. Коротченкова, Т. В. Федоров // Вестник Пермского университета. Геология. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 347-355.
168. Чалов, Р. С. Опасность русловых процессов на реках России: критерии оценки, картографирование, региональный анализ / Р. С. Чалов, А. В. Чернов, Н. М. Михайлова // Географический вестник=Geographical Bulletin – 2021. – Т. 1, № 56. – С. 53–67.
169. Черных, О. Н. Типизированные приемы экологического восстановления малых рек Москвы (на примере р. Сетунь) / О. Н. Черных, М. А. Сабитов, В. И. Алтунин // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 3. – С. 57-64.
170. Чертко, Н. К. Геохимия: учебное пособие для студентов высших учебных заведений по геологическим специальностям / Н. К. Чертко; Н. К. Чертко. – Минск: БГУ, 2009.
171. Шарафутдинов, Р. Н. Депонирование тяжелых металлов в донных отложениях в малых реках притока Камы (на примере реки Шильна) / Р. Н. Шарафутдинов, А. В. Михайлов // Вестник науки и образования. – 2020. – № 2. – С. 177-122.
172. Шилова, Н. А. Влияние тяжелых металлов на представителей фито- и зоопланктона в условиях засоления: дис. ... канд. биол. наук. / Шилова Наталья Александровна. – Саратов, 2014. – 133 с.
173. Шилова, А. В. Изменения микробиома как индикатор восстановления природных сред содового шламохранилища АО «Березниковский содовый завод» / А. В. Шилова,

А. Ю. Максимов, Ю. Г. Максимова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2020. – № 1(81). – С. 84-94.

174. Шинкарева, Г. Л. Геохимия тяжелых металлов и металлоидов в компонентах аквальных ландшафтов бассейна р. Селенги: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Шинкарева Галина Леонидовна. – Москва, 2018. – 178 с.

175. Щукова, И. В. Особенности формирования состава поверхностных вод в условиях минимальной техногенной нагрузки (бассейны Усолки и Боровой) / И. В. Щукова, И. А. Крутик // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 3-х томах, Пермь, 30 мая – 02 2019 года / Научный редакторы: А. Б. Китаев, В. Г. Калинин, К. Д. Микова. Том II. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. – С. 227-232.

176. Экологический мониторинг и оценка состояния окружающей среды горнодобывающих территорий / Е. А. Хайрулина, Е. А. Меньшикова, П. А. Белкин [и др.] // Экологическая безопасность освоения месторождений полезных ископаемых: Монография / Под общей редакцией Е.А. Хайрулиной. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – С. 6-49.

177. Эпов, В. Н. Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в применении к элементному анализу глубинной байкальской воды. Часть 1. Устойчивость элементного состава / В. Н. Эпов, Е. Н. Эпова, А. Н. Сутурин, А. Р. Семенов // Аналитика и контроль. – 2000. – Т. 4, № 2. – С. 202-208.

178. Юрова, Ю. Д. Геоэкологическая оценка антропогенного воздействия на водосборный бассейн реки Осётр: автореферат...дисс. канд.геогр. наук / Юрова Юлия Дмитриевна, Москва, 2022. – 28 с.

179. Янин, Е. П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности) / Е. П. Янин. – Москва: НП "АРСО", 2018. – 415 с.

180. Янин, Е. П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки) / Е. П. Янин // М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.

181. Янчук, М. С. Геохимические особенности и экологическое состояние малых рек Приангарья (на примере рек Боханского района) / М. С. Янчук // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2018. – Т. 26. – С. 125-138.

182. Яныгина, Л. В. Структурные перестройки донных сообществ малых рек бассейна Верхней Оби и Иртыша в зоне деятельности горнодобывающих предприятий / Л. В. Яныгина, А. А. Евсеева // Биология внутренних вод. – 2022. – № 2. – С. 198-204.

183. Ясинский, С. В. Формирование стока малых рек в крупном городе бассейна Волги (на примере Нижнего Новгорода) / С. В. Ясинский, М. Б. Алиева, М. В. Шмакова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 1. – С. 5-19.
184. Abbasi, T. Water quality indices based on bioassessment: the biotic indices / T. Abbasi, S.A. Abbasi // Journal of Water and Health. – 2011. – Vol. 9, № 2. – P. – 330-348.
185. Abdallah, M.A.M. Accumulation and distribution of heavy metals in surface sediments from the continental shelf adjacent to Abu Qir Bay, Egypt, as a function of grain size / M.A.M. Abdallah // Geo-Mar Lett. – 2023. – Vol.43. – P. 2.
186. Adamiec, E. An attempt to identify traffic related elements in snow / E. Adamiec, R. Wieszala, M. Strzebońska, E. Jarosz -Krzemińska // Geology, Geophysics and Environment. – 2013. – Vol. 39, is.4. – P. 317-329.
187. Antonson, H. Road salt damage to historical milestones indicates adaptation of winter roads to future climate change may damage Arctic cultural heritage / H. Antonson, P. Buckland, G. Blomqvist // Climate. – 2021. – Vol. 9. – P. 149.
188. Azad, A. M. Spatial distribution of mercury in seawater, sediment, and seafood from the Hardangerfjord ecosystem, Norway / A. M. Azad, S. Frantzen, M. S. Bank, I. A. Johnsen, E. Tessier, D. Amouroux, L. Madsen, A. Maage // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 667. – P. 622-637.
189. Binder, W. Ecological restoration of small water courses, experiences from Germany and from projects in Beijing / W. Binder, A. Göttle, D. Shuhuai // International Soil and Water Conservation Research. – 2015. – Vol. 3, № 2. – P. 141-153.
190. Birch, K. Introduction: Critical approaches to rentiership / K. Birch, C. Ward // Environment and Planning A: Economy and Space. – 2023. – Vol. 55, is. 6. – P. 1429-1437.
191. Birk, S. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive / S. Birk, W. Bonne, A. Borja, S. Brucet, A. Courrat, S. Poikane, A. Solimini, W. van de Bund, N. Zampoukas, D. Hering // Ecological Indicators. – 2012. – Vol. 18. – P. 31-41.
192. Boguta, P. The influence of the physicochemical properties of sediment on the content and ecotoxicity of trace elements in bottom sediments / P. Boguta, K. Skic, A. Baran, M. Szara-Bak // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. – P. 132366.
193. Boyd, E. S. Effect of salinity on mercury methylating benthic microbes and their activities in Great Salt Lake, Utah / E. S. Boyd, R. Q. Yu, T. Barkay, T. L. Hamilton, B. K. Baxter, D. L. Naftz, M. Marvin-DiPasquale // Science of the Total Environment. 2017. – Vol. 581-582. – P. 495-506.

194. Brix, K. V. The mechanisms of nickel toxicity in aquatic environments: An adverse outcome pathway analysis / K. V. Brix, C. E. Schlegel, E. R. Garman // *Environmental toxicology and chemistry*. – 2017. – V.36, № 5. – P. 1128-1137.
195. Burns, M. J. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform / M. J. Burns, T. D. Fletcher, C. J. Walsh, A. R. Ladson, B. E. Hatt // *Landscape and Urban Planning*. – 2012. – Vol. 105. – P. 230-240.
196. Chidiac, S. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives / S. Chidiac, P. El Najjar, N. Ouaini, Y. El Rayess, D. Azzi // *Reviews in environmental science and bio/technology*. – 2023. – Vol. 22, № 2. – P. 349-395.
197. de Castro-Català, N. Ecotoxicity of sediments in rivers: Invertebrate community, toxicity bioassays and the toxic unit approach as complementary assessment tools / N. de Castro-Català, M. Kuzmanovic, N. Roig, J. Sierra, A. Ginebreda, D. Barceló, S. Pérez, M. Petrovic, Y. Picó, M. Schuhmacher, I. Muñoz // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 540. – P. 297-306.
198. Du Laing, G. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the scheldt estuary / G. Du Laing, R. De Vos, B. Vandecasteele, E. Lesage, F. M. G., Tack, M. G. Verloo // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2008. – Vol. 77, № 4. – P. 589-602.
199. Dung, T. T. T. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils / T. T. T. Dung, V. Cappuyns, R. Swennen, N. K. Phung // *Reviews Environmental Science and Bio/Technology*. – 2013. – V. 12. – P. 335-353.
200. Edet, A. E. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria) / A .E. Edet, O. E. Offiong // *GeoJournal*. – 2002. – V. 57. – P. 295-304.
201. El morabet, R. Pollution and health risk assessment of water quality: a case study in Mohammedia prefecture in Morocco / R. El morabet, L. Berhazi, R. A. Khan, S. Bouhafa, N. A. Khan, T. Hakh, A. Romaniv // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2022. – V. 110, Is.2. – P. 67-85.
202. Feio, M. J. The biological assessment and rehabilitation of the World's rivers: An overview / M. J. Feio, R. M. Hughes, M. Callisto, S. J. Nichols, O. N. Odume, B. R. Quintella, M. Kuemmerlen, F. C. Aguiar, S. F .P. Almeida, P. Alonso-EguíaLis, et al. // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – P. 371.
203. Ferreira, S. L. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments-Practical aspects / S. L. Ferreira, J. B. da Silva Junior, I. F. dos Santos, O. M. de Oliveira, V. Cerda, A. F. Queiroz // *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. – 2022. – Vol. 35. – P. e00169.

204. Fierro, P. Macroinvertebrates and fishes as bioindicators of stream water pollution. In water quality / P. Fierro, C. Valdovinos, L. Vargas-Chacoff, C. Bertrán, I. Arismendi // Intechopen: Rijeka, Croatia. – 2017. – P. 23-38.
205. Flatley, A. River channel relocation: Problems and prospects / A. Flatley, I.D. Rutherford, R. Hardie // Water. – 2018. – Vol. 10. – P. 1360.
206. Flohr, L. Acute and chronic toxicity of soluble fractions of industrial solid wastes on *Daphnia magna* and *Vibrio fischeri* / L. Flohr, A. B. de Castilhos Júnior, W. G Matias // The Scientific World Journal. – 2012. – P. 643904.
207. Friedrich, G. The use of biological materials / G. Friedrich, D. Chapman, A. Beim // In: Chapman D (ed) Water quality assessments. 1992. – Chapman and Hall, London. – P. 171-238.
208. Gałuszka, A. Geochemical background of potentially toxic trace elements in reclaimed soils of the abandoned pyrite–uranium mine (south-central Poland) / A. Gałuszka, Z. Migaszewski, A. Duczmal-Czernikiewicz, S. Dołęgowska // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2016. – V. 13. – P. 2649-2662.
209. Gałuszka, A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland / A. Gałuszka // Environmental Geology. – 2007. – V. 52. – P. 861-870.
210. Gan, Y. Source quantification and potential risk of mercury, cadmium, arsenic, lead, and chromium in farmland soils of Yellow River Delta / Y. Gan, X. Huang, S. Li, N. Liu, Y. C. Li, A. Freidenreich, W. Wang, R. Wang, J. Dai // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 221. – P. 98–107.
211. Hakanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach / L. Hakanson // Water Research. – 1980. – V.14. – Is.8. – P. 975–1001.
212. Hao, L. Determination of the geochemical background and anomalies in areas with variable lithologies / L. Hao, X. Zhao, Y. Zhao, J. Lu, L. Sun // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 139. – P. 177-182.
213. Helsel, D. R. Statistical methods in water resources techniques of water resources investigations / D. R. Helsel, R. M Hirsch. // Book 4, chapter A3. U.S. Geological Survey, 2002 – 522 p.
214. Hu, Z. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update / Z. Hu, S. Gao // Chemical Geology. – 2008. – V. 253, Is. 3-4. – P. 205-221.
215. Ignatavičius, G. Geochemistry of mercury in soils and water sediments / G. Ignatavičius, M. H. Unsal, P. E. Busher, S. Wołkowicz, J. Satkūnas, G. Šulijienė, V. Valskys. // AIMS Environmental Science. – 2022. – Vol. 9, is. 3. – P. 277-297.
216. Ingersoll, C. G. Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines / C. G. Ingersoll, D. D. MacDonald, N. Wang, J. L. Crane, L. J. Field,

P. S. Haverland, N. E. Kemble, R. A. Lindskoog, C. Severn, D. E. Smorong // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2001. Vol. 1, № 41. – P. 8-21.

217. Jabłońska, A. Oligochaete communities of highly degraded urban streams in Poland, Central Europe / A. Jabłońska // North-Western Journal of Zoology. – 2014. – Vol. 10. – P. 74-82.

218. Jahan, S. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metals in the sediments of seaports of NSW, Australia / S. Jahan, V. Strezov // Marine pollution bulletin. – 2018. – Vol. 128. – P. 295-306.

219. Jeppesen, E. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function / E. Jeppesen, M. Meerhoff, K. Holmgren, I. González-Bergonzoni, F. Teixeira-de Mello, S. A. J. Declerck, L. De Meester, M. Søndergaard, T. L. Lauridsen, R. Bjerring, J-M. Conde-Porcuna, N. Mazzeo, C. Iglesias, M. Reizenstein, H. J. Malmquist, Z. Liu, D. Balayla, X. Lazzaro // Hydrobiologia. – 2010. – Vol. 646, № 1. – P. 73-90.

220. Jurajda, P. Impact of multiple stressors on the fish community pattern along a highly degraded Central European river - a case study / P. Jurajda, G. Streck, K. Roche, M. Janáč, Z. Jurajdová // Journal of Vertebrate Biology. – 2021. – Vol. 70, № 1. – P. 20066.

221. Kanbar, H. J. Iron mineralogy as a fingerprint of former steelmaking activities in river sediments / H. J. Kanbar, E. Montargès-Pelletier, B. Losson, I. Bihannic, R. Gley, A. Bauer, F. Villieras, L. Manceau, A. G. El Samrani, V. Kazpard, L. Mansuy-Huault // The Science of the total environment. – 2017. – Vol. 599-600. – P. 540-553.

222. Karthe, D. Water research in Germany: from the reconstruction of the Roman Rhine to a risk assessment for aquatic neophytes / D. Karthe, P. Chiffard, B. Cyffka et al. // Environmental Earth Sciences. – 2017. – Vol. 76. – P. 549.

223. Karr, J. R. Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale / J. R. Karr, K. D. Fausch, P. L. Angermeier, P. R. Yant, I. J. Schlosser // Illinois natural history survey special. Publication. – 1986. – Vol. 5. – P. 1-31.

224. Keck, F. Freshwater biomonitoring in the information age / F. Keck, V. Vasselon, K. Tapolczai, F. Rimet, A. Bouchez // Frontiers in Ecology and the Environment. – 2017. Vol. 15, iss. 5. P. 266-274

225. Khayrulina, E. Formation of solonchak in the area of the discharged ancient brine wells (Perm Krai, Russia) / E. Khayrulina, N. Mitrakova, N. Poroshina, E. Menshikova, A. Perminova // Frontiers Environmental Science. – 2022. – Vol. 10. – P. 858742.

226. Kolarova, N. Trace elements in aquatic environment. Origin, distribution, assessment and toxicity effect for the aquatic biota / N. Kolarova, P. Napiórkowski // Ecohydrology & Hydrobiology. – 2021. – Vol. 21, № 4. – P. 655-668.

227. Koniarz, T. Geochemistry indices and biotests as useful tools in the assessment of the degree of sediment contamination by metals / T. Koniarz, M. Tarnawski, A. Baran // *Geology, Geophysics&Environment*. – 2023. – Vol.43, is. 1. – P. 5-18.
228. Kulbat, E. Methods of assessment of metal contamination in bottom sediments (Case study: Straszyn Lake, Poland) / E. Kulbat, A. Sokołowska // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019. – Vol. 77. – P. 605-618.
229. Larsson, R. Coordination of water policies for quality and quantity: experiences from Nordic and Baltic countries / R. Larsson, A. Belinskij, B. Kløve, D. Meilutyte-Lukauskienė, E. Lode, E. Skarbøvik, V. Akstinas // *Hydrology Research*. – 2022. – Vol. 53, № 9. – P. 1166-1185.
230. Li, J. Review of remote sensing for environmental monitoring in China / J. Li, Y. Pei, S. Zhao, R. Xiao, X. Sang, C. A. Zhang // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – 1130.
231. Li, X. Effect of water level and salinity on metal fractionation in sediments of the Yellow River Delta / X. Li, X. Wang, J. Yu, et al. // *Wetlands*. 2020. – Vol. 40. – P. 2765-2774.
232. Liu, S. Water quality assessment by pollution-index method in the coastal water of Hebei Province in western Bohai Sea, China / S. Liu, S. Lou, C. Kuang, W. Huang, W. Chen, J. Zhang, G. Zhong // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – Vol 62. – P. 2220-2229.
233. López-López, E. Biological indicators of water quality: The role of fish and macroinvertebrates as indicators of water quality / E. López-López, J. E. Sedeño-Díaz // *In Environmental Indicators*. – 2015. – P. 643-661.
234. Macdonald, D. D. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems / D. D. Macdonald, C. G. Ingersoll, T. A. Berger // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2000. – Vol. 39. – P. 20-31.
235. Mamun, M. Land cover and human disturbance impact on water chemistry and ecological health in an asian temperate lotic system / M. Mamun, J.-E. Kim, K.-G An // *Land*. – 2022. – Vol. 11. – P. 1428.
236. Maskooni, E. K. Use of heavy metal content and modified water quality index to assess groundwater quality in a semiarid area / E. K. Maskooni, M. Naseri-Rad, R. Berndtsson, K. Nakagawa // *Water*. – 2020. – V. 12. – P. 1115.
237. Matschullat, J. Geochemical background—can we calculate it? / J. Matschullat, R. Ottenstein, C. Reimann // *Environmental Geology*. – 2000. – V. 39. – P. 990-1000.
238. Meland, S. Ecotoxicological effects of highway and tunnel wash water runoff / S. Meland // PhD Thesis [online]. Ås. Norwegian University of Life Sciences, 2010. – 86 p. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2431910>

239. Moldovan, A. Metal contents and pollution indices assessment of surface water, soil, and sediment from the Aries, river basin mining area, Romania / A. Moldovan, A. I. Török, E. Kovacs, O. Cadar, I. C. Mirea, V. Micle // Sustainability. – 2022. – V. 14. – P. 8024.
240. Mostafa, M. T. Urban geochemistry of heavy metals in road dust from Cairo megacity, Egypt: enrichment, sources, contamination, and health risks / M. T. Mostafa, H. El-Nady, R.M. Gomaa et al. // Environmental Earth Sciences. – 2024. – V. 83. – P. 37.
241. Morcillo, P. Mercury and its toxic effects on fish / P. Morcillo, M. A. Esteban, A. Cuesta // AIMS Environmental Science. – 2017. – Vol. 4, № 3. – P. 386-402.
242. Müller, A. The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources / A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, M. Viklander // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 709. – P.136125.
243. Müller, G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River / G. Müller // Geojournal. – 1969. – V. 2. – P. 108-118.
244. Nasrabadi, M. Effect of cadmium sorption by river sediments on longitudinal dispersion / M. Nasrabadi, A. Mahdavi Mazdeh, M. H. Omid // Water Supply. – 2022. – Vol. 22, is. 2. – P. 2212-2226.
245. Nawrot, N. Trace metal contamination of bottom sediments: A review of assessment measures and geochemical background determination methods / N. Nawrot, E. Wojciechowska, M. Mohsin, S. Kuittinen, A. Pappinen, S. Rezania // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – P. 872.
246. Niemiec, M. The content of lead, cadmium and mercury in sediments from rainwater reservoirs situated along the national road 4. / M. Niemiec // Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology. – 2016. – Vol. 20. – P. 75-83.
247. Nones, M. Consideration of hydromorphology and sediment in the implementation of the EU water framework and floods directives: a comparative analysis of selected EU member states / M. Nones, C. Gerstgraser, G. Wharton // Water and Environment Journal. – 2017. – Vol. 31, № 3. – P. 324-329.
248. Nuruzzaman, M. A brief account of river rehabilitation experiences / M. Nuruzzaman, A. Al Mamun, M. N. B. Salleh // IIUM Engineering Journal. 2017. – Vol. 18, No 1. P. 27-41.
249. Ottesen, R. T. Soil pollution in day-care centers and playgrounds in Norway: national action plan for mapping and remediation / R. T. Ottesen, J. Alexander, M. Langedal et al. // Environmental Geochemistry and Health. – 2008. – Vol. 30. – P. 623-637.
250. Poikane, S. European aquatic ecological assessment methods: A critical review of their sensitivity to key pressures / S. Poikane, F. Salas Herrero, M. G. Kelly, A. Borja, S. Birk, W. van de Bund // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 740. – P. 140075.

251. Quevedo, L. Effects of thermal pollution on benthic macroinvertebrate communities of a large Mediterranean River / L. Quevedo, C. Ibanez, N. Caiola, D. Mateu // *Journal of entomology and zoology studies*. – 2018. – Vol. 6. – P. 500-507.
252. Reimann, C. Statistical data analysis explained / C. Reimann, P. Filzmoser, R. G. Garrett, R. Dutter // John Wiley & Sons: London, UK, 2008. – 362 p.
253. Rødland, E. Road de-icing salt: assessment of a potential new source and pathway of microplastics particles from roads / E. Rødland, E. D. Okoffo, C. Rauert, L. S. Heier, O. C. Lind, M. Reid, K. V. Thomas, S. Meland // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 738. – P. 139352.
254. Rudnick, R. L. Composition of the continental crust / R. L. Rudnick, S. Gao // *Treatise on Geochemistry*. – 2003. – V. 3. – P. 1-64.
255. Schinegger, R. Untangling the effects of multiple human stressors and their impacts on fish assemblages in European running waters / R. Schinegger, M. Palt, P. Segurado, S. Schmutz // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 15, № 573. – P. 1079-1088.
256. Shadrin, N. Trace elements in the bottom sediments of the Crimean saline lakes. Is it possible to explain their concentration variability? / N. Shadrin, N. Mirzoeva, N. Kravchenko, O. Miroshnichenko, N. Tereshchenko, E. Anufrieva // *Water*. – 2020. – Vol. 12. – P. 2364.
257. Silva, L. F. O. Nanoparticles containing hazardous elements and the spatial optics of the Sentinel-3B OLCI satellite in Amazonian rivers: a potential tool to understand environmental impacts / L. F. O. Silva, B. W. Bodah, L. P. Lozano, M. L. S. Oliveira, C. Korcelski, L. S. Maculan, A. Neckel // *Environmental science and pollution research international*. – 2023. – Vol. 30, № 29. – P. 73780-73798.
258. Son, C. T. Assessment of Cau River water quality assessment using a combination of water quality and pollution indices / C. T. Son, N. T. H. Giang, T. P. Thao, N. H. Nui, N. T. Lam, V. H. Cong // *Journal of Water Supply: Research and Technology–AQUA*. – 2020. – Vol. 69. P. 160-172.
259. Tarnawski, M. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment / M. Tarnawski, A. Baran // *Archives of environmental contamination and toxicology*. – 2018. – Vol. 74, № 3. – P. 395-407.
260. Teodorovic, I. Sensitivity of bacterial vs. acute *Daphnia magna* toxicity tests to metals / I. Teodorovic, I. Planojevic, P. Knezevic, S. Radak, I. Nemet // *Open Life Sciences*. – 2009. – Vol. 4, № 4. – P. 482-492.
261. Uddin, M. G. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality / M.G. Uddin, S. Nash, A.I. Olbert // *Ecological Indicators*. – 2021. – № 122. – P. 107218.

262. Ushakova, E. Assessment of trace elements pollution in snow piles removed from residential areas in Perm, Russia / E. Ushakova, E. Menshikova, T. Karavaeva, A. Puzik, M. Volkova // *Journal of Water and Land Development*. – 2023. – Vol. 56. – P. 109-117.
263. Ushakova, E. Environmental aspects of potash mining: A case study of the Verkhnekamskoe potash deposit / E. Ushakova, A. Perevoshchikova, E. Menshikova, E. Khayrulina, R. Perevoshchikov, P. Belkin // *Mining*. – 2023. – Vol. 3, No. 2. – P. 176-204.
264. Ushakova, E. Impact of wastewater on water quality and fish community in the Tolych River, Perm Krai, Russia / E. Ushakova, E. Drobinina, A. Puzik, P. Mikheev // *Pollution*. – 2023. – Vol. 9, No. 2. – P. 459-476.
265. Ushakova, E. Environmental assessment impact of acid mine drainage from Kizel Coal Basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia) / E. Ushakova, E. Menshikova, S. Blinov, B. Osovetsky, P. Belkin // *Water*. – 2022. – Vol. 14. – P. 727.
266. Ushakova, E. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia) / E. Ushakova, E. Menshikova, S. Blinov, S. Vaganov, R. Perevoshchikov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2022. – Vol. 23, is. 4. – P. 1-16.
267. Ushakova, E. Trace element distribution in the snow cover of different functional zones in Berezniki-Solikamsk industrial hub, Russia / E. Ushakova, E. Menshikova, T. Karavaeva, A. Puzik // *Journal of Ecological Engineering*. – 2021. – T. 22, № 10. – C.28-39.
268. Verbovšek, T. A comparison of parameters below the limit of detection in geochemical analyses by substitution methods / T. Verbovšek // *RMZ–Materials and Geoenvironment*. – 2011. – Vol. 58. – P. 393-404.
269. Wan Abdul Ghani, W. M. H. Performance of biotic indices in comparison to chemical-based Water Quality Index (WQI) in evaluating the water quality of urban river / W. M. H. Wan Abdul Ghani, A. Abas Kutty, M. A. Mahazar et al. // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2018. – Vol. 190. – P. 297.
270. Wcisło, E. Human health risk assessment in restoring safe and productive use of abandoned contaminated sites / E. Wcisło, J. Bronder, A. Bubak, E. Rodríguez-Valdés, J. L. R. Gallego // *Environment international*. – 2016. – Vol. 94. – P. 436–448.
271. Whitehead, P. G. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality / P. G. Whitehead, R. L. Wilby, R. W. Battarbee, M. Kernan, A. J. Wade // *Hydrological Sciences Journal*. – 2009. – Vol. 54, № 1. – P. 101-123.
272. Wu, C. Geochemical compositions of size-fractionated sediment samples from the Yangtze and Yellow Rivers: Implications for chemical weathering, fractionation behavior of provenance tracers, and sources of radial sand ridges / C. Wu, Y. Wu, X. Yu, Y. Chen, W. Zhang, J. Liu, G. Wei // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2023. – Vol. 24. – P. e2023GC011059.

273. Yohannes, Y. B. Occurrence, distribution, and ecological risk assessment of DDTs and heavy metals in surface sediments from Lake Awassa-Ethiopian Rift Valley Lake / Y. B. Yohannes, Y. Ikenaka, A. Saengtienchai, K. P. Watanabe, S. M. Nakayama, M. Ishizuka // *Environmental science and pollution research international*. – 2013. – Vol. 20, is. 12. – P. 8663-8671.
274. Zakaria, M. Comparative analysis of biotic indices in water quality assessment: Case study at Sg. Bantang, Indonesia / M. Zakaria, M. Mohamed // *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*. – 2019. – Vol 269. – P. 012047.
275. Zare-Shahraki, M. A fish-based multi-metric assessment index in the Karun River basin, Iran / M. Zare-Shahraki, E. Ebrahimi-Dorche, Y. Keivany, K. Blocksom, A. Bruder, J. Flotemersch // *River Research and Applications*. – 2022. – Vol. 38, № 3. – P. 573-594.
276. Zgłobicki, W. Geochemical and statistical approach to evaluate background concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn (case study: Eastern Poland) / W. Zgłobicki, L. Lata, A. Plak, M. Reszka // *Environmental Earth Sciences*. – 2011. – V. 62. – P. 347-355.
277. Zhao, Y. Adsorption and migration of heavy metals between sediments and overlying water in the Xinhe River in central China / Y. Zhao, Y. Yang, R. Dai, S. Leszek, X. Wang, L. Xiao // *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. – 2021. – Vol. 84, № 5. – P. 1257-1269.
278. Zhu, S. Spatial distribution, source identification, and potential ecological risk assessment of heavy metal in surface sediments from river-reservoir system in the Feiyun River basin, China / S. Zhu, Z. Dong, B. Yang, G. Zeng, Y. Liu, Y. Zhou, J. Meng, S. Wu, Y. Shao, J. Yang, et al. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – V 19. – P. 14944.
279. Živić, I. Influence of the temperature regime on the composition of the macrozoobenthos community in a thermal brook in Serbia / I. Živić, Z. Marković, M. Brajković // *Biologia*. – 2006. – Vol. 61, № 2. – P. 179-191.

Нормативная литература

280. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. - М.: Издательство стандартов, 2023. – 57 с.
281. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. - М.: Издательство стандартов, 1982. – 7 с.
282. ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана Природы (ССОП). Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. Госстандарт СССР, 19.03.1982. 10 с.
283. Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. М.: Госкомитет СССР по гидрометеорологии, 1988. – 12 с.

284. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552.

285. Р 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. – Ростов-на-Дону: ГХИ, Росгидромет, 2012. 39 с.

286. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. – Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. – Ростов-на-Дону: ГХИ, Росгидромет, 2002. 55 с.

287. РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. – Ростов-на-Дону: ГХИ, Росгидромет, 2016. 104 с.

288. Региональные нормативы «Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан». Приказ Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан от 27.03.2019 № 316-п.

289. Региональный норматив. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. (1996). URL: http://repository.upi.edu/1360/1/s_d5451_0604180_chapter1.pdf.

290. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. С-Пб, Гидрометиздат, 1992. – 318 с.

291. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: –2021. – 496 с.

292. Свод правил. СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Издание официальное. – Москва: Минстрой России, 2021. – 150 с.

293. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» Постановление от 10 апреля 2007 г. № 219 "Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов.

Фондовые материалы

294. Максимович Г.А. Влияние древних рассолоподъемных скважин на обводненность Верхнекамского месторождения калийных солей / Г.А. Максимович. – Пермь, 1969 – 175 с.

295. Мельникова А.Г. Оценка воздействия на водные биологические ресурсы водотоков Пермского края при реализации проекта «Отработка шахтного поля рудника СКРУ-3 ПАО

«Уралкалий». Увеличение мощности до 16,0 млн. тонн» / А.Г. Мельникова – Пермь: ПермНИРО, 2021. – 76 с.

296. Харитонов Т.В. Создание сводных геологической и гидрогеологической карт Верхнекамского месторождения калийных солей масштаба 1:100 000. Листы: Р-40-138; О-40-5(в.п.); 6, 7(з.п.), 17(в.п.); 18; 19 (з.п.); 29 (в.п.); 30; 31 (з.п.), 42 (с.п.). В 5-ти книгах, 4-х папках / ФГУП «ГеокартаПермь» / Т.В. Харитонов. – Пермь, 2002.

Электронные ресурсы

297. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849> (дата обращения 07.06.2023).

298. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в городе Москве в 2021 году» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/271573220/> (дата обращения 07.06.2023).

299. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2022 году». URL: <https://priroda.permkrai.ru> (дата обращения: 09.11.23).

300. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2021 году». URL: <https://priroda.permkrai.ru> (дата обращения: 09.11.23).

301. Информационно-аналитический сборник «Состояние окружающей среды в Ленинградской области в 2022 году» [Электронный ресурс]. URL: <https://nature.lenobl.ru/ru/deiatelnost/ohrana-i-monitoring-okruzhayushej-sredy/> (дата обращения: 07.06.2023).

302. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. – 1000 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mnr.gov.ru> (дата обращения: 20.07.23).

303. Официальная страница Камского бассейнового водного управления [Электронный ресурс]. URL: <https://kambvu.ru/> (дата обращения: 26.12.23).

304. Официальная страница Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды управления [Электронный ресурс]. URL: <https://meteo.perm.ru/> (дата обращения: 26.12.23).