

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Ушакова Евгения Сергеевна

**ЭКОГЕОХИМИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ УРБАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРНОГО ПРИКАМЬЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.21 – Геоэкология

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель:

Меньшикова Елена Александровна

доктор геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», заведующая кафедрой минералогии и петрографии

Официальные оппоненты:

Опекунов Анатолий Юрьевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геоэкологии Института наук о Земле Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», профессор

Мазухина Светлана Ивановна

доктор геолого-минералогических наук, лаборатория междисциплинарных эколого-экономических исследований Института проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Защита состоится «25» сентября 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.29
д.б.н., профессор



Барановская
Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 оценкой 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 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg в воде и донных отложениях малых рек района исследования, характеристика их эколого-геохимического состояния;
- 3) Комплексование 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 «Эколум») 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 условные 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,

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

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 администрациями 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 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.

Полевые исследования проводились с 2014 по 2022 г.г. в период летней межени в бассейнах малых рек Пермского края, впадающих в верхнюю часть Камского водохранилища и административно расположенных на территории Соликамского городского округа (р. Чёрная; р. Усолка с притоками) и муниципального образования «Город Березники» (р. Толыч и ее приток р. Затолыч; р. Зырянка с притоками). Для эколого-геохимической оценки малых рек 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 условных фоновых проб воды и донных отложений, отобранных в пределах исследуемой территории в верховьях рек на значительном удалении от техногенного воздействия, 57 (рис.1). 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.



Рисунок 1 – Карта-схема пунктов опробования речных вод и донных отложений

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.).

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.

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); 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.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ПОЛОЖЕНИЕ 1. *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⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺. Наибольшая доля микрокомпонентов, превышающих условные фоновые значения, характерна для малых рек с наименьшей площадью водосбора, где техногенный сток значительно превышает естественный.*

Значительная вариация распределения микроэлементов в бассейнах исследуемых рек Соликамско-Березниковской агломерации связана с поступлением загрязнения от различных источников, что требует учета в подходах к оценке уровня загрязнения поверхностных вод, а также донных отложений, являющихся источниками первичного и вторичного загрязнения вод, что отмечается многими исследователями (Закруткин и др., 2020; Nawrot et al., 2023). Существующие методы оценки уровня загрязнения тяжелыми металлами водных объектов разделяются на три группы: геохимические методы (Kc, Zc, I_{geo}); методы, основанные на использовании нормативов содержания (ПДК); методы, связанные с использованием комплексных индексов загрязнения (ИЗВ,

HEI, ERI, RI, PECQ), которые позволят оценить и экологическое состояние водосбора в целом. Все указанные подходы использованы в данной работе.

Важным этапом оценки состояния малых рек является анализ структуры речных бассейнов. Для рассматриваемых объектов он показал, что реки Усолка и Зырянка имеют схожие гидрологические характеристики, доли площадей, занятых промышленными объектами и городской застройкой, объемы поступления загрязнения за счет задекларированных источников. Эти реки имеют высокую транспортирующую способность и выносят загрязняющие вещества в нижнее течение (табл. 1).

Небольшая площадь водосбора в сочетании со значительной долей площадей, занятых промышленными объектами и городской застройкой, имеющих водонепроницаемую поверхность, снижает поступление естественного стока в реки Чёрную и Толыч. В сочетании с большим количеством сточных вод разной степени очистки это предопределяет формирование стока этих рек преимущественно за счет техногенных факторов.

Таблица 1 – Характеристика малых рек на 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 _{водосбор} = 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 _{водосбор} = 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 _{водосбор} = 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 _{водосбор} = 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 принята в соответствии с Правилами использования водных ресурсов Верхне-Зырянского и Нижне-Зырянского водохранилищ.

Формирование химического состава вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации обусловлено уровнем техногенного воздействия, связанного с поступлением разного объема декларированных сбросов сточных вод, а также диффузного загрязнения от промышленных объектов горно-химической отрасли и поверхностного стока с городской территории (табл. 1).

В результате различных гидрологических условий и степени техногенного воздействия на водосборе происходит трансформация химического состава вод исследованных объектов от HCO₃⁻-Ca²⁺ (минерализация 0,3 г/л) к Cl⁻-Na⁺ и Cl⁻-Ca²⁺ (минерализация 15 г/л), которая связана как с природными (геологическое строение, разгрузка естественных минерализованных вод из родников (минерализация до 4 г/л), так и с техногенными факторами – фильтрацией хлоридных рассолов (с минерализацией 30-400 г/л) от объектов размещения отходов калийных предприятий и сбросами сточных вод предприятий, использующих в своем производстве рассолы или руды Верхнекамского месторождения солей, поступлением хлоридных рассолов из старых рассолоподъемных скважин (с минерализацией более 30 г/л), что отмечалось в предыдущих исследованиях (Бельтюков, 2000; Белкин, 2019).

Гидрохимическая фация фоновых водотоков гидрокарбонатно-кальциевая с ультрапресными и пресными водами (0,36-0,58 г/л), на этих участках рек отмечаются низкие концентрации микроэлементов. 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 исследованных элементов. При сравнении концентраций микроэлементов в речных водах малых рек с фоновыми значениями выявлен наибольший уровень превышения по Pb (в 790 раз) в р. Усолке, по As (в 772 раза), Ni (в 156 раз), Cr (в 127 раз), Zn (в 55 раз), Cu (в 44 раз) в р. Чёрной (табл. 2).

Таблица 2 – Содержание микроэлементов в поверхностных водах малых рек Соликамско-Березниковской агломерации, мкг/дм³

| Элемент | 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,% | |
| Cr | < 1,0 – 18,0 5,89 | 86 | < 1,0 – 921,7 151,42 | 192 | 2,74 – 4,74 3,43 | 24 | < 1,0 – 176,4 14,82 | 225 | 7,27 |
| Ni | < 1,0 – 39,0 7,80 | 136 | < 1,0 – 546,0 151,57 | 141 | 12,61 – 31,34 20,88 | 35 | < 1,0 – 43,7 5,5 | 157 | 3,51 |
| Cu | < 1,0 – 63,0 8,92 | 196 | < 1,0 – 103,0 27,88 | 148 | 3,02 – 7,76 5,07 | 35 | < 1,0 – 9,45 2,63 | 85 | 2,35 |
| Zn | < 1,0 – 40,0 5,94 | 153 | < 1,0 – 167,0 42,44 | 152 | 3,45 – 7,08 5,21 | 25 | < 1,0 – 41,95 5,79 | 158 | 3,03 |
| As | < 1,0 – 5,0 1,72 | 80 | 1,0 – 386,25 86,34 | 150 | < 1,0 – 4,29 1,30 | 112 | 2,84 – 13,78 8,28 | 253 | 0,5 |
| Cd | < 0,5 – 0,37 0,29 | 34 | < 0,5 – 1,60 0,52 | 121 | < 0,50* | 0 | < 0,50 | 0 | 0,25 |
| Pb | < 0,2 – 79,0 4,23 | 462 | < 0,2 – 3,70 1,19 | 149 | < 0,2 – 0,43 0,25 | 51,66 | < 0,2 – 39,32 6,05 | 160 | 0,1 |

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

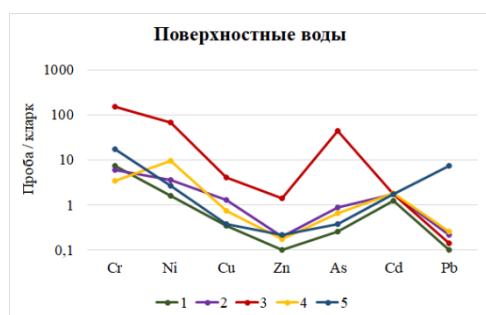


Рисунок 2 – Средние содержания микроэлементов и условный фон, нормированные по средним глобальным концентрациям (1 – фон; 2 – р. Усолка; 3 – р. Чёрная; 4 – р. Толыч; 5 – р. Зырянка)

Сравнение концентраций элементов в водах исследуемых малых реках со среднемировыми концентрациями микроэлементов в речных водах по В.В. Гордееву и А.П. Лисицыну (2014) выявило значительные превышения по Cr, Ni, As, Cu, Zn и Cd в водах р. Чёрной (рис. 2). При этом превышения по Cr (в 7,3 раза) и Ni (в 1,7 раз) зафиксированы и в условных фоновых пробах для этой территории исследования.

Условный фон по всем исследуемым микроэлементам повсеместно превышен в водах р. Толыч. В водах р. Усолки 100% проб превышают условные фоновые значения по Pb, 48% – по Zn и As, 44% – по Cu, 40% – по Ni, 28% – по Cr, 8% – по Cd.

В воде р. Чёрной условные фоновые значения превышены во всех пробах по As и Pb, 80% проб – по Cr, в 70% – по Ni, в 60% – по Zn, в 50% – по Cu, в 30% – по Cd. В водах р. Зырянки превышения условных фоновых значений зафиксированы во всех пробах по As, в 93% проб по Pb, в 43% – по Cu и Zn, в 34% – по Cr, в 7% – по Ni.

Рост концентраций микроэлементов 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. 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) (рис. 3). 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.

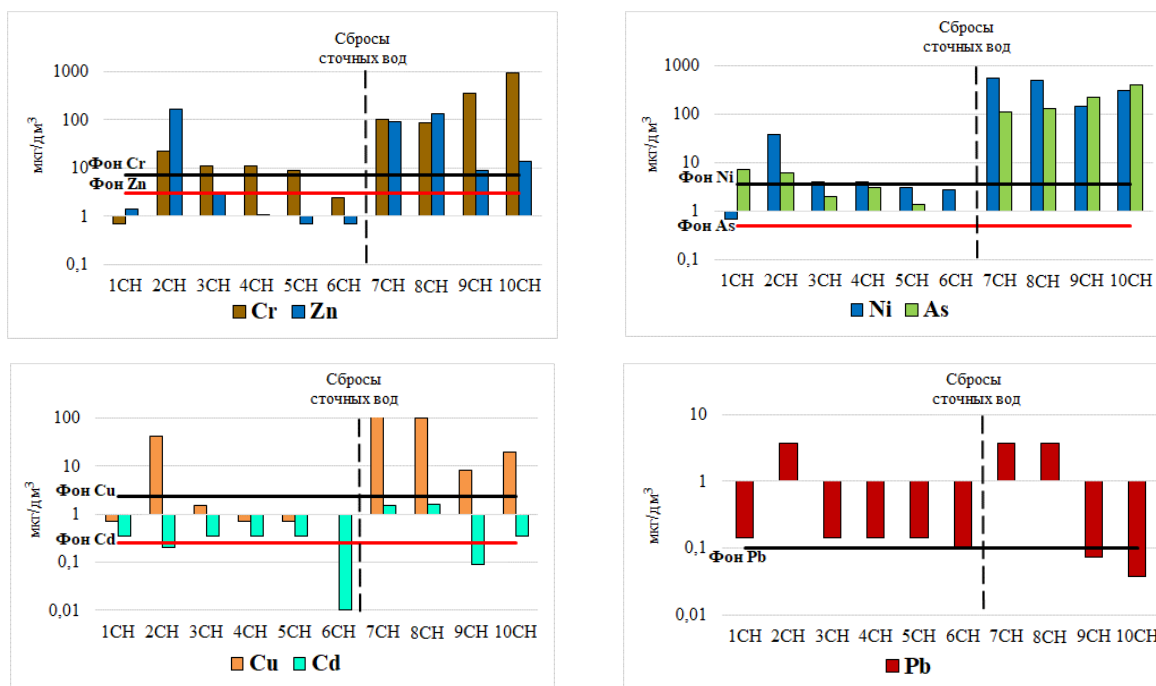


Рисунок 3 – Распределение микроэлементов в водах р. Чёрной

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.

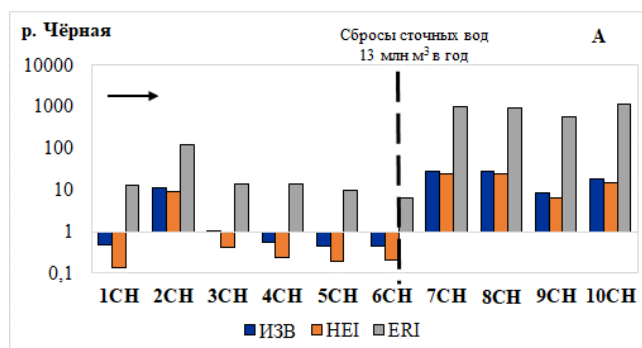


Рисунок 4 – Экологическая оценка уровня загрязнения микроэлементами

Применение индексов экологического состояния вод (табл. 3, рис. 4) демонстрирует наибольший уровень загрязнения в р. Чёрной. Для этого объекта с учетом медианных значений ИЗВ воды соответствуют категории «грязной», высокий уровень загрязнения вод демонстрирует и показатель ERI. При этом в самом техногенно-нагруженном бассейне р. Толыч, уровень загрязнения вод по данным индексов ИЗВ, HEI и ERI для исследованных микроэлементов варьировался от низкого до среднего.

Таблица 3 – Медианные значения индексов экологического состояния речных вод малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

| Показатель | Усолка | Чёрная | Толыч | Зырянка |
|------------|--------|--------|-------|---------|
| ИЗВ | 1,0 | 4,7 | 1,5 | 0,9 |
| HEI | 0,6 | 3,4 | 1,1 | 0,7 |
| ERI | 105,3 | 386,6 | 148,8 | 283,5 |

В р. Зырянке за счет преобладания естественного стока над техногенным (≈ 313 раз), экологическое состояние вод благоприятное, что подтверждают медианные значения индексов экологического состояния – по ИЗВ воды чистые, отмечен низкий уровень загрязнения по HEI и средний уровень загрязнения по ERI.

На трансформацию химического состава вод, помимо сбросов сточных вод в исследуемые малые реки, оказывает родниковая разгрузка, связанная с перетоками подземных вод (с минерализацией до 3 г/л) из соляно-мергельной толщи (нижнесоликамская подсвита (P_{1sl2})), терригенно-карбонатной толщи (верхнесоликамская подсвита (P_{1sl1})) (Максимович, Первова, 2012), миграцией соленых вод от объектов производственной деятельности калийных предприятий. Эти процессы отмечены на р. Зырянке, где на участке между водохранилищами в левобережных притоках зафиксированы существенные превышения относительно ПДК_{рх} по Cl⁻ (в 19 раз), Mg²⁺ (12), Na⁺ (9), Ca²⁺ (7) и высокие концентрации микрокомпонентов, которые превышают условные фоновые значения в 393 раза для Pb, 104 – As, 24 – Cr, 14 – Zn, 12 – Ni, 4 – Cu.

В водах р. Усолки зафиксировано превышение относительно ПДК_{рх} по NO₂⁻ (126 раз), Cl⁻ (3), Mg²⁺, Na⁺, K⁺ (2), высокие концентрации исследованных микроэлементов, среди которых максимальное превышение над условным фоном отмечено по Pb (до 790 раз), Cu (27), Zn (13), Ni (11), As (10), Cr (2). Наибольшее увеличение концентраций макро- и микрокомпонентов в исследуемом бассейне происходит на участке жилой застройки г. Соликамска, где помимо влияния поверхностного стока с селитебной территории, в р. Усолку поступают высокоминерализованные воды родников и рассолы из старых рассолоподъёмных скважин. При этом в р. Усолке за счет преобладания естественного стока над техногенным (≈ 21 раз) воды характеризуются как чистые по ИЗВ, по HEI и ERI уровень загрязнения вод низкий.

Анализ корреляционных зависимостей между основными ионами в воде исследуемых рек выявил ведущую роль в формировании их химического состава Cl⁻, Ca²⁺, определяющих повышение уровня минерализации вод и отражающих специфику поверхностных вод Соликамско-Березниковской агломерации, связанную с Верхнекамским месторождением солей. 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. 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⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, что характерно для природных вод на территории Верхнекамского месторождения.

В р. Чёрной выявлена положительная корреляция ($0,70 < r < 0,97$) между Cr, As, Cu, Ni и Cd с Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺. В р. Толыч отмечена очень сильная связь ($0,89 < r < 0,92$) между As с Cl⁻, Ca²⁺, K⁺. В р. Зырянке зафиксирована положительная корреляция содержания микрокомпонентов с горно-химическим профилем промышленной

специализации территории исследований и природными условиями, обусловленными Верхнекамским месторождением.

ПОЛОЖЕНИЕ 2. Среди исследованных объектов Соликамско-Березниковской агломерации наиболее высоким уровнем загрязнения микроэлементами донных отложений характеризуется р. Толыч со следующим рядом распределения элементов $Hg > Zn > Cu > Ni > Cd > Pb > As$, 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.

Вариация содержаний микроэлементов в донных отложениях малых рек г. Соликамска и г. Березники, как и в поверхностных водах связана с природными и техногенными факторами, что особенно ярко проявляется для р. Толыч и р. Черная, характеризующихся наименьшей площадью водосбора и значительным техногенным стоком. При сравнении концентраций микроэлементов в донных отложениях с условными фоновыми значениями наибольший уровень превышения выявлен 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 (табл. 4).

Таблица 4 – Содержание микроэлементов в донных отложениях малых рек Соликамско-Березниковской агломерации, мг/кг

| Элемент | 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,% | |
| 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 |

Геохимическая специфика донных отложений с учетом рекомендаций в работе Н.С. Касимова и Д.В. Власова (2016) оценена на основании использования 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). Условные фоновые концентрации исследованных элементов в донных отложениях рассматриваемой территории существенно ниже кларков для верхней части континентальной коры, за исключением Cd (рис. 5). Наибольшая степень обогащения тяжелыми металлами донных отложений относительно значения для верхней части континентальной коры зафиксирована в р. Толыч по Cd и Hg (до 30 раз).

Использование подхода на основании сравнения с ПДК для почв также демонстрирует превышения содержаний микроэлементов в донных отложениях этих объектов. Так для донных отложений р. Толыч 34% проб характеризуются превышениями по Hg и Cd, 17% проб по Ni и Zn. В р. Чёрной нормативные значения для почв превышены по Ni (30% проб) и As (10% проб), которые зафиксированы в нижнем течении реки.

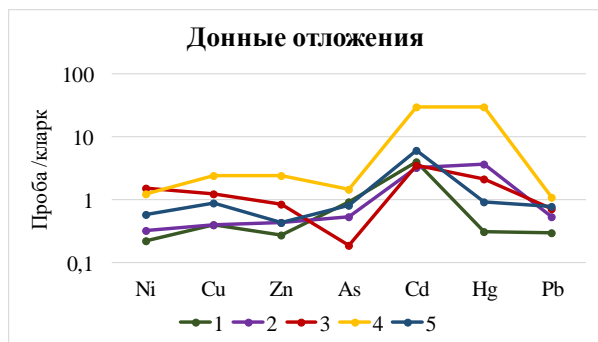


Рисунок 5 – Средние содержания микроэлементов и условный фон, нормированные по кларку (1 – фон; 2 – р. Усолка; 3 – р. Чёрная; 4 – р. Толыч; 5 – р. Зырянка)

отложений зафиксирован в р. Толыч, что подтверждается всеми использованными подходами (геохимическим, санитарно-гигиеническим и экотоксикологическим). Наиболее интенсивная аккумуляция в донных отложениях р. Толыч характерна для Hg, концентрации которой определялась методом ICP-MS с использованием внутреннего и внешнего контроля в разных аккредитованных лабораториях.

Для объектов с большей площадью водосбора ситуация благоприятная – в донных отложениях р. Усолки отсутствуют превышения по содержанию исследованных микроэлементов во всех пробах, в бассейне р. Зырянки отмечено только разовое превышение по As.

Низкий уровень загрязнения донных отложений по интегральным индексам наблюдается в р. Чёрной, где отмечено наиболее высокое загрязнение вод (табл. 5). В связи с экстремально высокими концентрациями микроэлементов, наиболее высокий уровень загрязнения донных

Таблица 5 – Медианные значения индексов экологического состояния донных отложений малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

| Показатель | Усолка | Чёрная | Толыч | Зырянка |
|-------------|---|--|---|--|
| <i>Kc</i> | Hg _{12,0} Ni _{2,1} Zn _{2,0} Pb _{1,9} Cd _{1,6} Cu _{1,5} As _{1,4} | Zn _{2,3} Hg _{2,3} Cu _{2,1} Ni _{1,7} Pb _{1,6} | Hg _{96,2} Zn _{8,4} Cu _{7,2} Ni _{4,0} Cd _{3,5} Pb _{3,1} As _{1,8} | Pb _{2,8} Ni _{2,6} Cu _{2,3} Zn _{2,0} Cd _{2,0} Hg _{1,5} |
| <i>Zc</i> | 13,2 | 18,2 | 114,2 | 8,3 |
| <i>PECQ</i> | 0,6 | 0,2 | 0,5 | 0,2 |
| <i>RI</i> | 493,3 | 214,5 | 3983,3 | 164,1 |

Водная вытяжка донных отложений р. Толыч демонстрирует трансформацию состава с переходом от $HCO_3^- - Ca^{2+}$ в среднем течении к $Cl^- - Na^+$ и Ca^{2+} в нижнем течении реки, что выявлено и для речных вод этого объекта. Хлорид-ион в соленой воде образует устойчивый комплекс с тяжелыми металлами, при этом выделение элементов в осадок увеличивается при повышении уровня солености (Li et al., 2020). Эти процессы следует рассматривать важным условием высокой аккумуляции микроэлементов в донных отложениях р. Толыч. При этом на современное экологическое состояние бассейна р. Толыч влияют и другие факторы, определяющие значения абиотических и биотических показателей (рис. 6).

В бассейне р. Толыч повышенные концентрации микроэлементов в донных отложениях связаны с разными источниками воздействия, так превышения Ni зафиксированы после сбросов сточных вод предприятия цветной металлургии. При этом данный элемент не входит в перечень задекларированных загрязняющих веществ (рис. 7). Согласно задекларированным источникам загрязнения в бассейне р. Толыч, поступление отдельных микроэлементов осуществляется только в верхней части водосбора (Cu, Cr суммарно ≈2,8 кг/год).

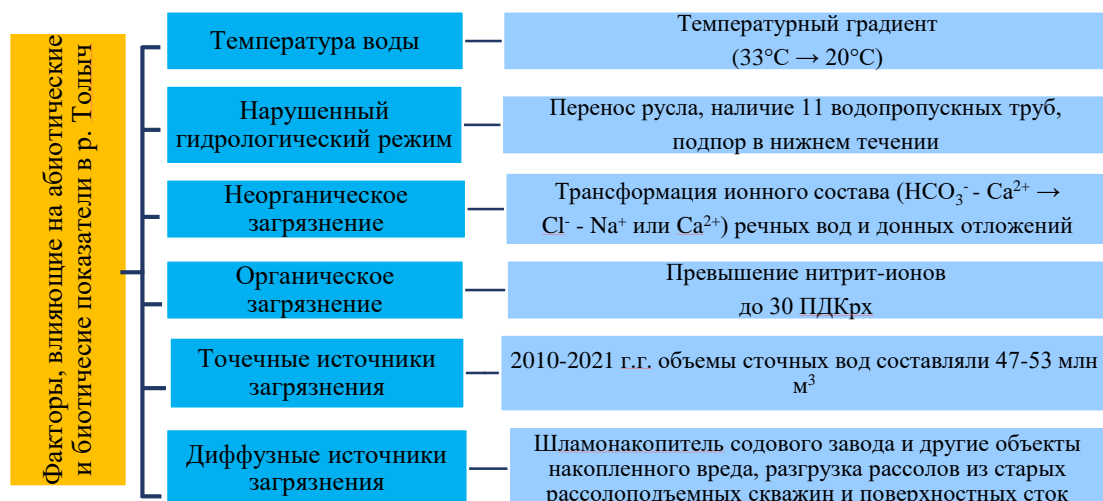


Рисунок 6 – Факторы, определяющие экологическое состояние р. Толыч

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. Максимальные концентрации Cu, Zn, As и Hg в донных отложениях зафиксированы в месте слияния р. Толыч с р. Затолыч, что может быть обусловлено влиянием неустановленных источников загрязнения выше по течению, высокими содержаниями хлорид-ионов, ограничивающих подвижность этих элементов, низкими скоростями течения.

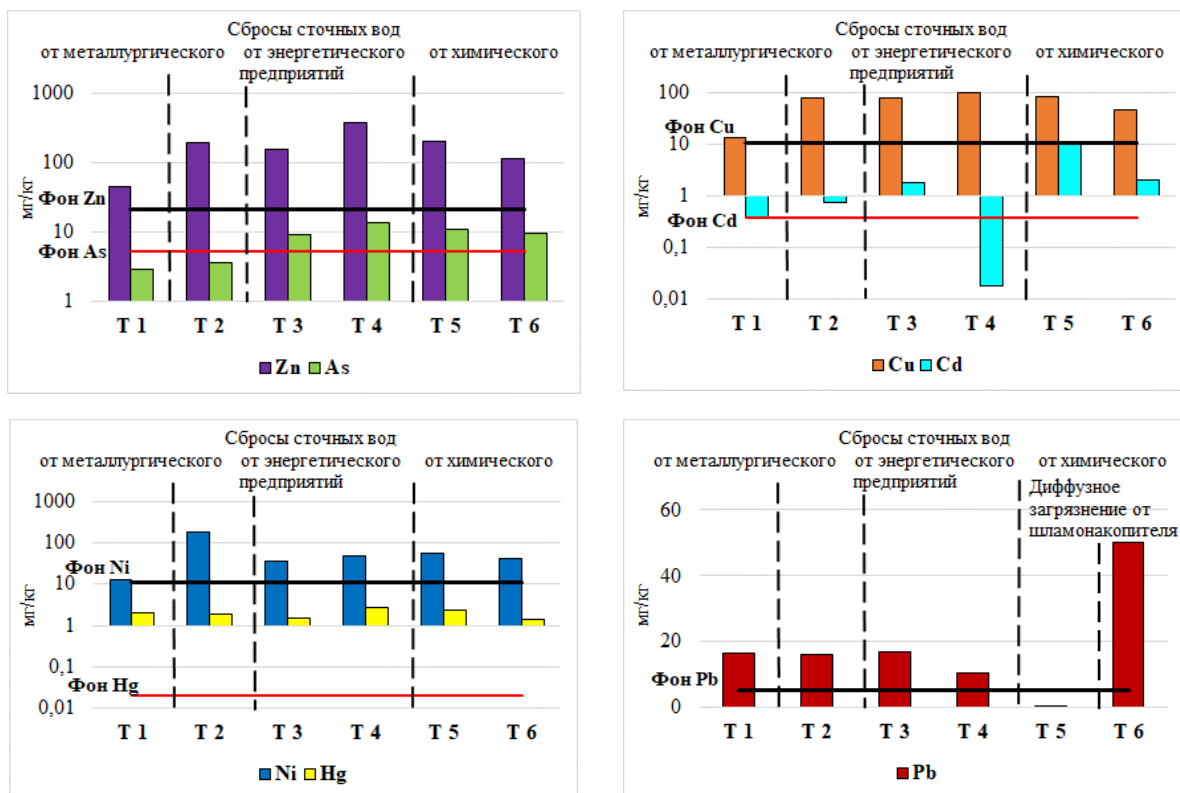


Рисунок 7 – Распределение микроэлементов в донных отложениях р. Толыч

По результатам корреляционного анализа в донных отложениях бассейна р. Усолки обнаружена статистически значимая ($p < 0,05$) положительная корреляция

($r=0,75$) между Zn и Cu. Для этого объекта отмечены и повсеместные превышения условных 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). Также наблюдается умеренная корреляция между As и Hg ($r=0,63$). Превышения фоновых значений по Hg зафиксированы в 96% проб (до 38 раз), по As – 16% проб (до 1,8 раза).

В донных отложениях р. Чёрной наиболее сильная значимая положительная связь установлена между Ni и Cu ($r=0,95$), Ni и As ($r=0,70$), что указывает на один источник поступления этих элементов. При этом содержания Ni и Cu в донных отложениях превышают фоновые значения в 90% проб (до 21,7 и 7,7 раза, соответственно), а As – в 50% проб (до 1,6 раза). Умеренная корреляция между As и Cu ($r=0,68$), As и pH ($r=0,66$) совпадает с высокими концентрациями этих элементов, связанными с техногенными источниками в пределах бассейна р. Чёрной.

В донных отложениях р. Толыч значительные положительные корреляции ($r=0,88$) обнаружены между Zn и Cu. Содержания элементов во всех пробах превышает условные фоновые значения в ≈ 9 раз, указывая на единый их источник поступления в бассейн. В р. Зырянке сильная корреляция выявлена между Cu и Ni ($r=0,77$) и Ni и Pb ($r=0,76$), умеренная корреляция между Cu и Pb ($r=0,68$). Содержание Pb превышает фоновые значения в 93% проб (до 3,8 раза), Ni – 89% проб (до 5 раз), Cu – в 86% проб (до 4,6 раза).

Различия в корреляциях между микроэлементами в донных отложениях исследуемых объектов зависят от физических, химических и биологических процессов в водной среде, а также точечных и неточечных источников загрязнения, геохимической специализации пород в пределах водосборных бассейнов. 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, что свидетельствует о разных источниках поступления в отложения. 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).

ПОЛОЖЕНИЕ 3. *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.*

Бассейн р. Толыч был использован в качестве модельного объекта для апробации комплексирования абиотических и биотических подходов к оценке загрязнения. По уровню загрязнения бассейн р. Толыч подразделяется на два участка, наихудшее экологическое состояние водного объекта зафиксировано после сброса сточных вод химического предприятия в 2,5 км от устья (Т5-Т8) (рис. 8, табл. 6, 7). Уровень загрязнения микроэлементами речных вод (Т1-Т4), оцененный по показателям ИЗВ, НЕІ, ЕRI на этом участке соответствует среднему, при очень высоком уровне загрязнения микроэлементами донных отложений. Рассчитанные значения биотических индексов (Шеннона, Вудивисса, Гуднайта-Уитли, Кинга и Болла) охарактеризовали воду как «чистую» на данном участке реки (табл. 7).

Таблица 6 – 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 | 12,0 | – | – | 15,0 |
| Средняя глубина, м | 0,04 | – | 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 | $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+*}$ $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ | $\text{Cl}^- \text{-Na}^+$ $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ | $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ | $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ $\text{Cl}^- \text{-Na}^+$ | $\text{Cl}^- \text{-Na}^+$ $\text{Cl}^- \text{-Na}^+$ | $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ | $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ | $\text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+}$ $\text{Cl}^- \text{-Na}^+$ |
| pH | 7,6 | 7,7 | 8,0 | 7,9 | 7,6 | 7,3 | 7,2 | 7,3 |
| Сумма солей в водной вытяжке ДО, мг/кг | 1435 | 731 | 1059 | 7277 | 2655 | – | – | 3124 |

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

После сброса сточных вод цветной металлургии

После сброса сточных вод энергетической промышленности

После сброса сточных вод химической промышленности

Таблица 7 – 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.

Результаты оценки токсичности донных отложений методом биотестирования с использованием двух тест-объектов продемонстрировали их разную чувствительность к уровню загрязнения. Наиболее чувствительными организмами в данном исследовании являются *V. fischeri* в отличие от *D. magna*. По результатам индекса токсичности (Т) с тест-объектом *V. fischeri* пробы донных отложений на этом участке характеризуются как токсичные.

Ниже сброса сточных вод химического предприятия (Т5-Т8) для этого участка р. Толыч биотические индексы значительно дополняют результаты по абиотическим индексам загрязнения. Согласно значениям биотических индексов макрозообентоса воды относятся к категории «грязных».

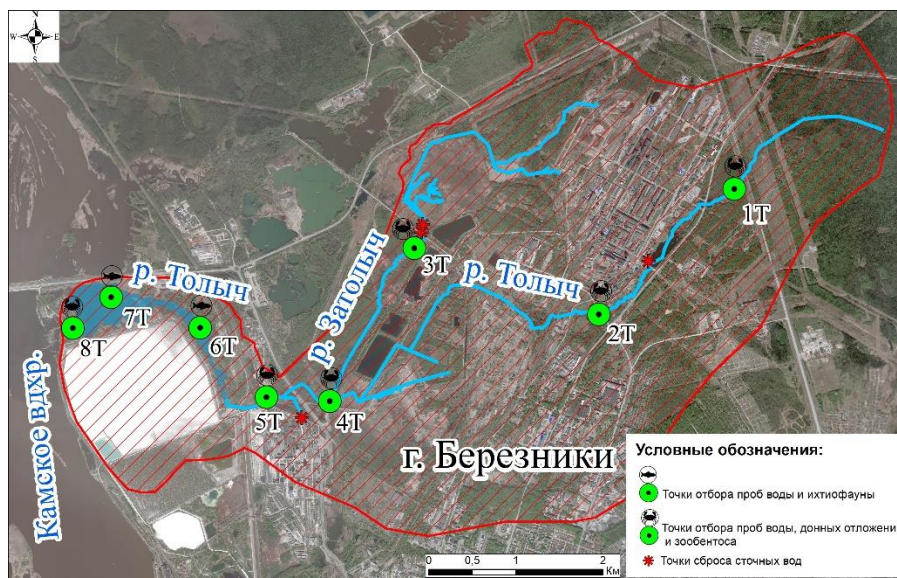


Рисунок 8 – Схема комплексного опробования бассейна р. Толыч

Низкое качество воды, оцененное по индексу Карра по составу рыбного сообщества, подтверждает деградацию биоты на нижних трофических уровнях для макрозообентоса и, как следствие, для зоопланктона. Качество вод в нижнем течении соответствует среднему уровню загрязнения, а донные отложения – высокому уровню загрязнения.

Кластерный анализ между абиотическими и биотическими индексами выявил два кластера. В первый входят EI (индекс эвтрофикации) и RI (индекс потенциального экологического риска), во второй – все оставшиеся индексы (рис. 9а). Отсутствие связей EI и RI с другими показателями обусловлено набором параметров, используемых для их расчета, которые в итоге являются несопоставимыми для общей экологической оценки бассейна реки.

Использование в кластерном анализе 12 индексов (без EI и RI) (рис. 9б) выявило три группы: OPI (индекс органического загрязнения) и индекс Гуднайта-Уитли; ERI и Zc; все остальные индексы. Дендрограмма, показывающая кластеризацию используемых индексов, объяснила вариацию результатов биотических индексов. Так, показатель OPI имеет тесную связь с олигохетным индексом (индикатор органического загрязнения), тем самым подтверждая наличие органического загрязнения, которое выражено высокими концентрациями нитрит-ионов в речных водах р. Толыч. Тесная связь между индексом Вудивисса и индексом Кинга и Болла объясняется индикацией в них крупных таксонов зообентоса. В целом отчетливо видны значимые связи между абиотическими (ИЗВ, PECQ, HEI) и биотическими показателями (индексы Шеннона, Вудивисса и Кинга и Болла).

Результаты индекса видового разнообразия Шеннона не достоверно отражают экологическое благополучие р. Толыч за счет преобладания олигохетных и хирономидных групп в донных отложениях. 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.

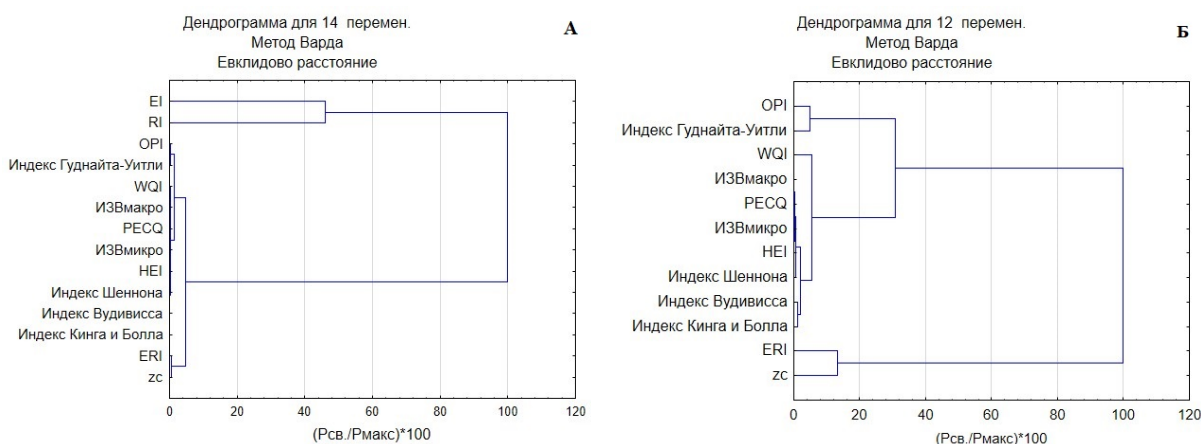


Рисунок 9 – Дендрограммы корреляционной матрицы абиотических и биотических индексов в бассейне р. Толыч

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 (табл. 8). Наиболее репрезентативными участками для оценки экологического состояния бассейнов малых рек является их устьевая часть перед впадением в Камское водохранилище. Высокие концентрации микроэлементов в донных отложениях р. Чёрной (Ni) и р. Толыч (Hg, Zn, Cd, Cu, Pb, As) представляют потенциальную опасность первичного и вторичного загрязнения речных вод, биоаккумуляции этих элементов бентосными макробеспозвоночными и ихтиофауной.

Таблица 8 – 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.

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 10 представлены обобщенные данные по

степени загрязнения поверхностных вод и донных отложений устьевых участков исследуемых рек с применением различных интегральных индексов.

Повышение уровня засоления (увеличение Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+}), которое сопровождается увеличением концентраций микроэлементов в реках Соликамско-Березниковской агломерации (рис. 11), связано как сбросами сточных вод предприятий, использующих в своем производстве рассолы или соли Верхнекамского месторождения, так и диффузным загрязнением природного и техногенного характера, что отмечается во многих работах (Хайрулина, 2023; Лепихин и др., 2020; Бельтюков, 2000).

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 (табл. 9). В связи с тем, что высокий уровень техногенной нагрузки в верхней части Камского водохранилища связан с разными источниками поступления исследованных компонентов в акваторию малых рек на этом участке (рис. 11), 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. Эти исследования можно рассматривать как часть программы по реабилитации р. Камы (<https://kambvu.ru>).

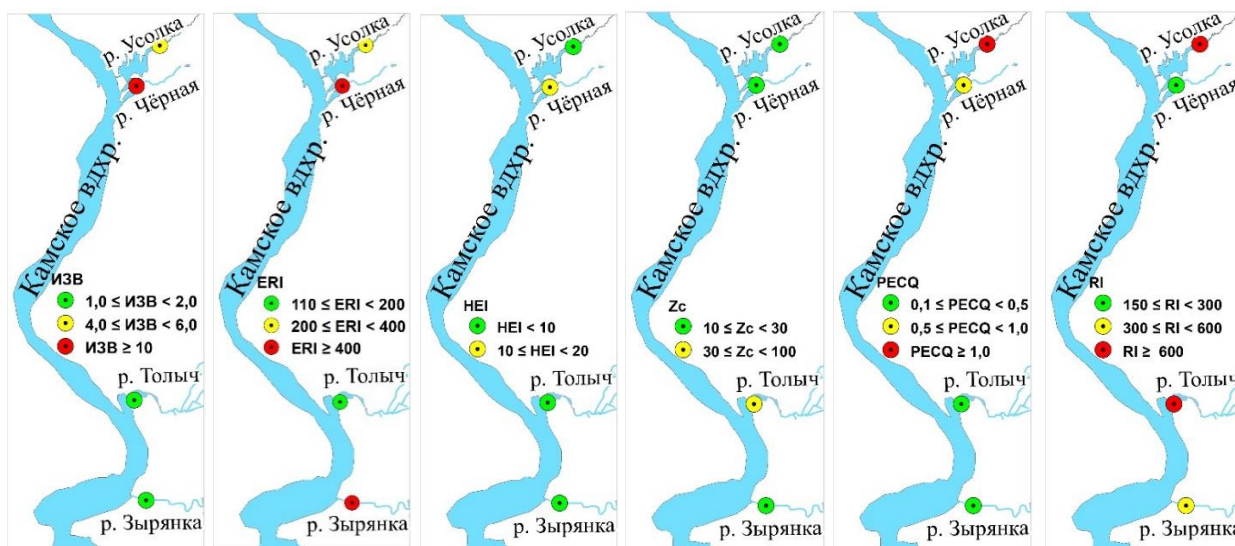


Рисунок 10 – Эколого-геохимическая оценка устьевых участков малых рек Соликамско-Березниковской агломерации

С учетом того, что водные объекты включают в себя поверхностные воды, донные отложения и биоту, 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. Анализ химического состава донных отложений служит индикатором степени и масштаба загрязнения водотоков, отражая и экологическое состояние водосборных площадей. При высоком уровне загрязнения водных объектов гидробионты, для которых донные отложения выступают средой обитания, являются высокочувствительным инструментом для оценки изменения качества речных вод и донных отложений.

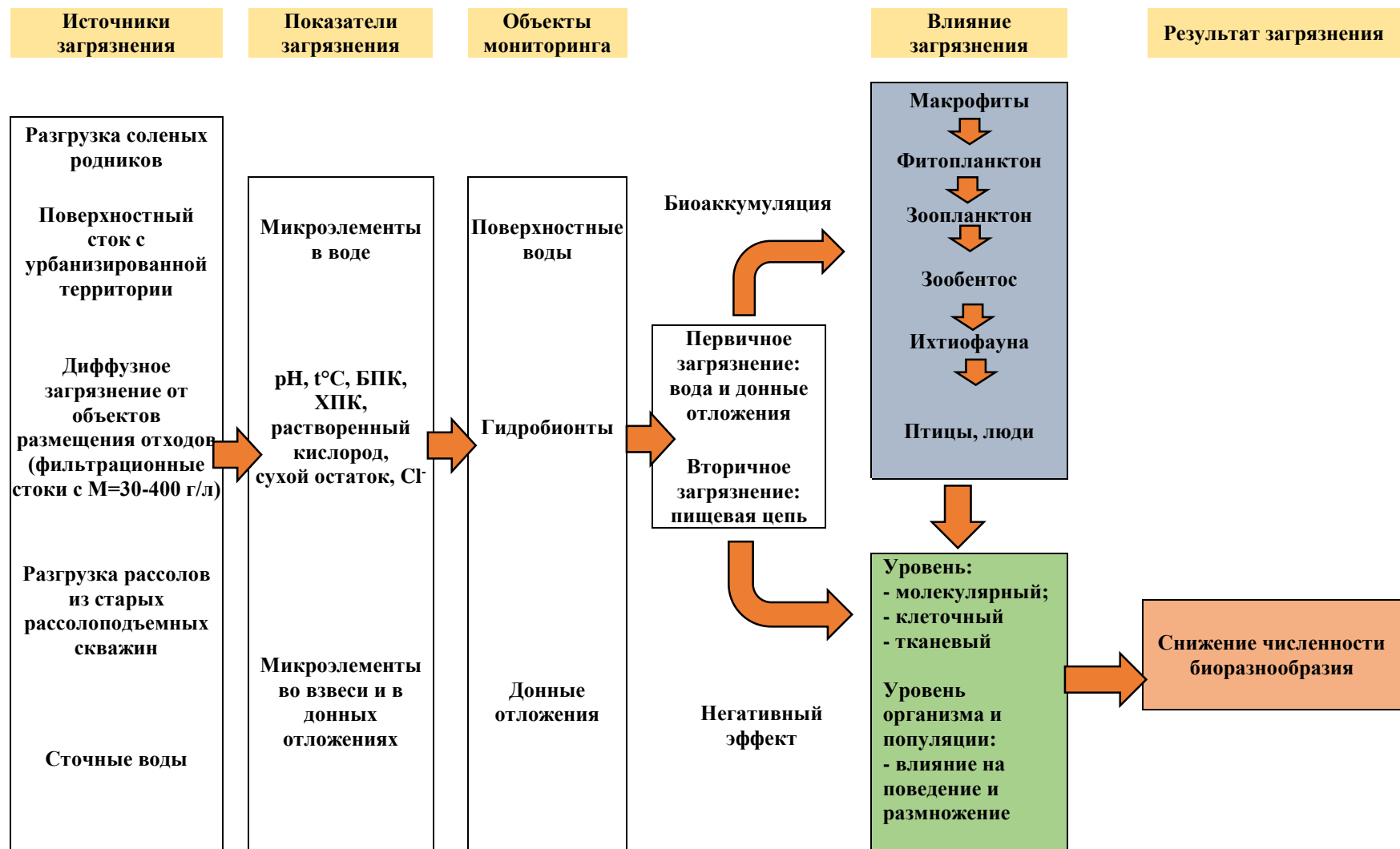


Рисунок 11 – Блок-схема процессов распределения загрязнения в малых реках Соликамско-Березниковской агломерации

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 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. Для таких техногенно-нагруженных водных объектов, наряду со стандартными методами химического анализа вод и донных отложений, с целью оперативного контроля деградации состояния водных экосистем необходимо использовать методы биоиндикации и биотестирования, которые позволяют фиксировать прямую реакцию живых организмов на комплексное воздействие.

Для понимания особенностей формирования режима водных объектов, разработки мероприятий по снижению загрязнения, необходима оценка эколого-геохимической обстановки их водосборных бассейнов с анализом его структуры, источников поступления загрязняющих веществ, функционального использования земель. 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. Оценка качества воды и донных отложений должна производиться по стандартному перечню показателей с учетом специфики техногенной нагрузки на территории водосбора, а методы оценки включать геохимические, санитарно-гигиенические и комплексные показатели загрязнения (табл. 9).

Таблица 9 – Перечень определяемых компонентов при организации мониторинга водных объектов на территории Соликамско-Березниковской агломерации

| Объекты мониторинга | Показатели оценивания: | |
|---|--|--------------------|
| | Российские | Зарубежные |
| Речные воды: <i>Гидрологические:</i> Расход воды, Скорость течения, Уровень воды, <i>Гидрохимические:</i> Физические: органолептические свойства, температура, рН. 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, рН. <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 | |

Основой геохимического метода является сравнительная оценка загрязнения поверхностных вод и донных отложений с условным фоном, нормирование данных

относительно среднемировых концентраций химических элементов. Санитарно-гигиенические методы должны включать нормирование качества воды с ПДК_{рх}, ввиду того, что притоки малых рек имеют важное рыбохозяйственное значение при заходе ихтиофауны на нерест и нагула молоди из Камского водохранилища. Альтернативой при отсутствии нормативов для донных отложений в РФ является использование ПДК для почв. Использование интегральной оценки качества водных объектов, таких как ИЗВ, HEI и ERI в поверхностных водах, Zc, RI и PECQ – в донных отложениях, позволяет осуществить комплексную оценку загрязнения рек микроэлементами по степени накопления, уровню загрязнения и воздействию на гидробионты, провести сравнительную оценку исследуемых объектов с другими территориями (табл. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. 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 содержания 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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).

5. 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.

6. 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»).

7. 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).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science

1. **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. (ВАК)

2. **Ushakova E.** Impact of Wastewater on Water Quality and Fish Community in the Tolych River, Perm Krai, Russia. // **Ushakova E.**, Drobinina E., Puzik A., Mikheev P. Impact of Wastewater on Water Quality and Fish Community in the Tolych River, Perm Krai, Russia. Pollution. – 2023. – 9(2). – P. 459-476.

3. **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. (ВАК)

Публикации в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

1. **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.

Публикации в журналах и материалах конференций

1. **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-х томах. Новочеркасск, 2023. С. 159-164.

2. **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: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Пермь, 23-24 мая 2023. – Пермь: ПГНИУ, 2023. – Вып. 6(43) – С. 308-314.

3. **Ушакова Е.С.** Биоиндикация при оценке экологического состояния малых рек / **Е.С. Ушакова**, Н.Н. Паньков, П.А. Белкин // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 25-28 мая 2023, Пермь: ПГНИУ, 2023. – Т.2. – С. 133-138.

4. **Ушакова Е.С.** Зообентос как индикатор антропогенного изменения аквальных ландшафтов / **Е.С. Ушакова**, Т.И. Караваева, П.А. Белкин // Водные ресурсы - основа глобальных и региональных проектов обустройства России, Сибири и Арктики в XXI веке. Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 17-18 марта 2022. – Тюмень: ТИУ, 2022. – С. 82-86.

5. **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: 41-я Всероссийская научно-практическая конференция, Пермь, 18-19 мая 2021. – Пермь: ПГНИУ, 2021. – С. 316-321.

6. **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: 40-я Всероссийская научно-практическая конференция, Пермь, 19-20 мая 2020. – Пермь: ПГНИУ, 2020. – С. 243-251.

7. **Ushakova E.** Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit / **Ushakova E.**, **Perevoshchikova A.**, **Menshikova E.**, **Khayrulina E.**, **Perevoshchikov R.**, **Belkin P.** // Mining. – 2023. – 3 – P. 176–204.

Учебные пособия

1. Ворончихина Е.А. Геохимия ландшафта / Е.А. Ворончихина, **Е.С. Ушакова**. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2012. – 139 с.