

На правах рукописи



РЕШЕТНЯК ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА
(РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Специальность – 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Ростов-на-Дону – 2025

Работа выполнена на кафедре геоэкологии и прикладной геохимии
Института наук о Земле Южного федерального университета

Научный руководитель: **Закруткин Владимир Евгеньевич**,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего
образования «Южный федеральный университет»

Официальные оппоненты: **Даувальтер Владимир Андреевич**,
доктор географических наук, профессор, Институт
проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ
«Кольский научный центр Российской академии
наук», главный научный сотрудник
Иванов Дмитрий Владимирович,
доктор географических наук, Институт проблем
экологии и недропользования Академии наук
Республики Татарстан, заведующий лабораторией
биогеохимии

Защита диссертации состоится **«19» июня 2025 года в 13:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.11 по географическим наукам на базе Института наук о Земле Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, к. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1337842/>

Автореферат разослан «___» апреля 2025 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием полностью ФИО, учёной степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью организации просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, на имя и.о. ученого секретаря диссертационного совета ЮФУ801.01.11 О.В. Ивлиевой, а также в формате pdf на e-mail: olgare1@mail.ru (до отправки по почте).

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Ивлиева Ольга Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Донные отложения занимают важное место в биогеохимических циклах водных экосистем. Они представляют собой наиболее значимый фактор, определяющий направленность различных процессов, в том числе миграции и перераспределения веществ внутри водоема. С одной стороны, донные отложения аккумулируют загрязняющие вещества, а с другой, при определенных условиях, служат потенциальным источником вторичного загрязнения водной среды (Денисова, 1987; Манихин, Никаноров, 2001; Хованский, 1993).

В настоящее время на фоне возрастающей антропогенной нагрузки на поверхностные водные объекты суши концентрации загрязняющих веществ в донных отложениях на порядок выше, чем их концентрация в водной толще (Манихин, Никаноров, 2001; Закруткин и др., 2021). Особенно это характерно для районов с развитой промышленностью.

Восточный Донбасс, расположенный на западе Ростовской области, представляет собой зону размещения месторождений угля и предприятий угледобывающей промышленности. Традиционно Восточный Донбасс – это один из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов Ростовской области (Закруткин и др., 2016; Гавришин и др., 2019; Коломенский и др., 2006). Наибольшую озабоченность у исследователей вызывают гидроэкологические проблемы, связанные, в первую очередь, с ухудшением качества поверхностных и подземных вод и невозможностью их использования населением для питьевых и хозяйственных целей (Гавришин, 2018; Мохов и др., 2005).

В последние 30 лет реки Восточного Донбасса, а именно реки бассейнов Северского Донца и Тузлова, испытывают большое влияние угольной промышленности, в первую очередь, за счет поступления техногенных шахтных вод в поверхностные водные объекты (Гавришин и др., 2018; 2019). С ними в реки поступает огромное количество сульфатов и тяжелых металлов, среди которых соединения железа, марганца, стронция, меди и др. (Закруткин и др., 2016; Гавришин и др., 2019; Приваленко и др., 2004). При этом меняется химический состав не только воды, но и донных отложений, также происходит преобразование минерального состава осадков.

Донные отложения являются конечным звеном ландшафтно-геохимических сопряжений, поэтому во многом отражают геохимические особенности водосборных площадей. Благодаря этому по составу осадков можно выделить техногенные потоки и оценить степень их воздействия на речные системы (Закруткин и др., 2016).

С учетом вышеизложенного оценка химического состава донных отложений рек Восточного Донбасса является актуальной не только с точки зрения

исследования уровня их загрязненности, но и с позиции оценки их как источника вторичного загрязнения речных вод и опасности для водных экосистем в целом.

Степень разработанности темы исследования. Изучению химического состава донных отложений и уровня их загрязненности посвящено большое количество публикаций в отечественной и зарубежной литературе. Весь спектр этих работ условно можно разделить на исследования морских осадков (Э.А. Остроумов, Е.А. Романкевич, А.П. Лисицын, Г.Г. Матишов, А.С. Астахов, Н.М. Страхов, А.Р. Roberts, G.M.S. Abraham и др.), отложений озер и водохранилищ (В.А. Даувальтер, М.В. Мартынова, Д.В. Иванов, И.И. Косинова, L. Nakanson, U. Förstner и др.), а также донных отложений рек (Ю.Е. Саэт, Е.П. Янин, Н.Г. Максимович, G. Muller, А.-М. Dendievel, О. Oyewumi и др.), изучение которых имеет свою специфику.

Отдельно стоит выделить работы, посвященные выявлению закономерностей распределения веществ в системе «вода – донные отложения» (М.В. Мартынова, П.И. Линник, Дж. Мур, С. Рамамурти, А.М. Никаноров, U. Förstner и др.) и основным факторам формирования химического состава речных отложений (Ю.Е. Саэт, Е.П. Янин, Н.Г. Максимович, В.А. Даувальтер, А.-М. Dendievel и др.).

Вопросами экологических проблем Восточного Донбасса начали заниматься более 30 лет назад. В исследованиях В.В. Приваленко, А.Д. Хованского, А.И. Гавришина, Ю.А. Федорова, А.В. Мохова, Г.Ю. Коломенского и др. изучена степень изменения природных сред под влиянием ликвидированных шахт региона. Сотрудниками кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле ЮФУ под руководством В.Е. Закруткина также проводились комплексные исследования водных ресурсов Восточного Донбасса. Показано, что поверхностные водные объекты испытывают комплексное воздействие в районах добычи, переработки и хранения угля. При этом наиболее уязвимы малые и средние реки в силу невысокой самоочищающей способности.

Ключевые вопросы геохимии донных отложений водных объектов детально изложены и в работах зарубежных исследователей (L. Nakanson, G. Muller, D.C. Tomlison, U. Forstner, G.M.S. Abraham, О. Oyewumi, А.-М. Dendievel и др.). Рассматриваются методологические подходы к отбору проб и химическому анализу, оценке уровня загрязненности осадков, изучается токсический эффект элементов в донных отложениях, а также степень влияния техногенных факторов на состав осадков.

В настоящее время большое внимание исследователи уделяют разработке методологии оценки уровня загрязненности донных отложений водных объектов как в России, так и за рубежом (В.С. Валиев, Н.И. Куракина, Е.П. Овчарова, И.И. Косинова, Е.П. Янин, G.M.S. Abraham, W.H. Klemt, T.Nasrabadі и др.). Кроме того,

геоэкологические проблемы промышленных территорий, связанные с добычей и переработкой полезных ископаемых, хорошо освещены в ряде статей В.А. Даувальтера, В.Е. Закруткина, Е.А. Красавцевой, З.И. Служковского, Е.П. Янина, P.F. Avila, W.H. Klemt, G. J. León-García, J. Wang, J. Wei и др.

Цель диссертационного исследования – дать эколого-геохимическую оценку донных отложений рек бассейнов Тузлова и Северского Донца в пределах углепромышленной территории Восточного Донбасса.

Задачи исследования.

1. Проанализировать основные природные и техногенные факторы формирования природно-техногенной геохимически аномальной зоны на территории Восточного Донбасса.

2. Рассмотреть существующие методические подходы к оценке уровня загрязненности донных отложений рек и усовершенствовать методику оценки с учетом специфики изучаемого объекта.

3. Изучить минеральный и химический состав донных отложений рек бассейнов Северского Донца и Тузлова.

4. Оценить пространственную изменчивость содержания элементов и уровня загрязненности донных отложений рек бассейнов Северского Донца и Тузлова с учетом влияния техногенных шахтных вод и вероятности вторичного загрязнения рек.

5. Выявить особенности временной изменчивости (по вертикальному разрезу) содержания элементов и уровень загрязненности донных отложений изучаемых рек.

Научная новизна. На основе анализа существующих методик предложен усовершенствованный интегральный показатель оценки уровня загрязненности донных отложений рек (ИПЗ_{до}) Восточного Донбасса, который позволяет отразить не только уровень накопления металлов в донных отложениях, но и опасность вторичного загрязнения водной толщи материалом донных отложений.

Впервые на основе расчета накопленной массы элементов в донных осадках и результатах эксперимента по изучению миграционной способности элементов в системе «вода – донные отложения» определены участки рек с наибольшей опасностью вторичного загрязнения вод. Это участки рек Тузлов, Большой и Малый Несветай в бассейне Тузлова; Большая Каменка, Лихая, Кундрючья и Большая Гнилуша в бассейне Северского Донца, донные отложения которых характеризуются высокими значениями накопленной массы элементов.

Впервые для региона исследования проведено изучение распределения элементов в донных отложениях не только в пространственном аспекте, но и по вертикальному разрезу, что позволяет оценить временную изменчивость техногенного воздействия на водные объекты. Показано, что наибольший уровень

загрязненности осадков соответствует времени завершения ликвидации нерентабельных шахт Восточного Донбасса, когда вынос загрязняющих веществ в речную сеть с шахтными водами был максимальным.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в совершенствовании методики интегральной оценки уровня загрязненности донных отложений рек в пределах техногенно нарушенных территорий Восточного Донбасса, которая позволяет учесть как степень опасности элементов для речных экосистем, так и потенциальный риск вторичного загрязнения водной толщи материалом донных отложений. Результаты исследования являются базовыми для отдельных разделов геохимии, гидрохимии, геоэкологии, региональной гидрохимии и ключевыми при совершенствовании методологии оценки качества водных объектов.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования гидроэкологической ситуации на водосборах рек, а также при проведении мониторинга качества окружающей среды в части наблюдений за состоянием и загрязнением водных объектов. Материалы исследования могут быть применены в комплексной оценке состояния рек исследуемого региона и для разработки экологически обоснованных мероприятий по восстановлению речных систем в зоне влияния угольной отрасли. Основные результаты научной работы используются при подготовке лекционных и практических занятий в рамках дисциплин «Гидрохимия», «Геохимия окружающей среды» по направлению 05.03.06 (05.04.06) «Экология и природопользование».

Материалы и методы исследования. Исследование выполнено на результатах гранта РФФИ № 14-17-00376 «Интегральная оценка и прогноз состояния водных ресурсов и их качества в пределах техногенно нарушенных геосистем углепромышленных территорий на основе комплексных геохимических, геофизических и экотоксикологических исследований» (2014-2016 гг.) в части исследований донных отложений. В рамках гранта, одним из исполнителей которого являлся автор, был собран и проанализирован большой массив данных о химическом и минеральном составе донных отложений рек Восточного Донбасса. Дополнительный материал получен при реализации гранта РФФИ № 22-27-00305 «Донные отложения рек как индикатор антропогенного воздействия и качества водной среды в бассейне Северского Донца (в пределах Ростовской области)» (2022-2023 гг.). Автор принимал участие на всех этапах полевых, камеральных и экспериментальных работ.

Комплексный характер исследования определил необходимость применения методов, используемых в различных областях: геоэкологии, геохимии, гидрохимии и т.д. Выбор мест отбора проб, пробоотбор и аналитические работы

выполнялись в строгом соответствии с нормативными и руководящими документами, методическими указаниями.

Методология исследования базируется на основных геоэкологических подходах и использовании описательного, сравнительно-географического, картографического, статистического методов, а также методов химического анализа воды и донных отложений. Для статистической и картографической обработки данных использованы программные средства Microsoft Office и QGIS 3.16.16.

Основные положения, выносимые на защиту

1. На основе анализа существующих методик и подходов сформулированы принципы оценки уровня загрязненности речных отложений Восточного Донбасса и разработан интегральный показатель загрязнённости донных отложений ИПЗ_{до}, который позволяет отразить не только уровень накопления тяжелых металлов в донных отложениях, но и опасность вторичного загрязнения ими водной толщи.

2. По интегральному показателю загрязненности донные отложения рек характеризуются как умеренно загрязнённые, на некоторых участках рек сохраняется высокий уровень загрязненности. Для донных отложений рек бассейна Северского Донца в целом характерен более низкий уровень загрязненности, чем для рек бассейна Тузлова.

3. Данные о распределении элементов по вертикальному разрезу донных отложений указывают на то, что наибольший уровень загрязненности осадков соответствует периоду с 2005 по 2010 г., т.е. времени завершения ликвидации нерентабельных шахт Восточного Донбасса, когда вынос загрязняющих веществ с техногенными шахтными водами был максимальным.

4. Оценка миграционной способности металлов в системе «вода – донные отложения» показала, что наибольшую активность проявляют соединения марганца, меди и цинка с точки зрения возможности вторичного загрязнения. Наибольшая опасность вторичного загрязнения отмечена для участков рек Тузлов, Большой и Малый Несветай в бассейне Тузлова; Большая Каменка, Лихая, Кундрючья и Большая Гнилуша в бассейне Северского Донца, донные отложения которых характеризуются высокими значениями накопленной массы элементов.

Личный вклад автора состоит в активном участии в полевых и камеральных работах, отборе проб воды и донных отложений, подготовке образцов к аналитическим испытаниям, участии в лабораторных анализах, интерпретации полученных результатов, а также их статистической и графической обработке; подготовке материалов к публикации по итогам проведенных исследований.

Степень достоверности и апробация результатов. Использование обширных данных полевых и лабораторных исследований, анализ предшествующих работ как по Восточному Донбассу, так и по методам оценки уровней загрязненности донных осадков водных объектов, применение современных методов статистической обработки и картографического представления результатов обеспечивает высокую степень достоверности полученных научных результатов.

По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 11 статей (в т.ч. 5 статей в журналах из списка ВАК, 6 статей в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus), а также 15 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций.

Результаты исследования были представлены на 9 научных конференциях всероссийского и международного уровней.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Результаты научного исследования соответствуют паспорту специальности 1.6.21. Геоэкология: п. 5 «Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод) ...», п. 8 «Разработка теории, методологии и методов комплексных инженерных изысканий для геоэкологической характеристики природно-техногенной среды», п. 16 «Моделирование геоэкологических процессов и последствий хозяйственной деятельности для природных комплексов и их отдельных компонентов. Современные методы геоэкологического картирования, ГИС-технологии и информационные системы в геоэкологии».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 177 страницах, включает 30 таблиц и 34 рисунка. Список литературы состоит из 155 источников, включая 30 иностранных.

Благодарности. Автор выражает глубокую и искреннюю признательность научному руководителю, профессору, д.г.-м.н. В.Е. Закруткину за всестороннюю поддержку и помощь на всех этапах выполнения диссертационного исследования. Кроме того, автор выражает огромную признательность сотрудникам кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле ЮФУ за помощь в проведении полевых и камеральных работ, научные консультации и советы, особенно доценту, к.г.н. Гибкову Е.В. и зав. кафедрой, к.г.-м.н. Г.Ю. Складенко.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 ВОСТОЧНЫЙ ДОНБАСС КАК ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ АНОМАЛИЯ

Региональные природно-техногенные геохимические аномалии формируются при сочетании природных особенностей территории и влиянии антропогенных факторов. По степени воздействия на природные ландшафты антропогенные факторы в значительной степени отличаются, и геохимический вклад отдельных техногенных источников может резко превалировать над другими. Как известно, в пределах Восточного Донбасса именно угольная промышленность предопределила существующие геохимические особенности территории. Промышленная разработка содержащегося в недрах Восточного Донбасса высококачественного каменного угля в течение последних двух столетий привела к формированию региональной природно-техногенной геохимической аномалии. Длительное по времени и обширное по площади влияние добычи угля на компоненты окружающей среды резко усилилось в последние 30 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности, в результате которой большинство шахт Восточного Донбасса были закрыты. Таким образом, на примере Восточного Донбасса мы имеем дело с характерным примером природно-техногенной геохимической региональной аномалии, в пределах которой геологические и физико-географические условия в сочетании с существующими здесь техногенными факторами способствуют формированию полиэлементных геохимических аномалий во всех компонентах окружающей среды, в особенности в поверхностных и подземных водах.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлись донные отложения рек бассейнов Северского Донца (реки Калитва, Кундрючья, Быстрая, Лихая, Большая Гнилуша, Большая и Малая Каменка) и Тузлова (реки Большой и Малый Несветай, Аюта, Грушевка, Кадамовка и Атюхта). Исследования донных отложений рек Восточного Донбасса проводились с 2014 по 2023 год. В основе научной работы лежат данные о химическом, минеральном, петрохимическом и гранулометрическом составе донных отложений рек исследуемого региона. Массив данных включает в себя результаты приближенно-количественного спектрального анализа валовых проб и отдельных выделенных фракций (129 проб), количественного химического анализа валовых проб (58 проб) и выделенной пелитовой фракции речных осадков (64 пробы), определения минерального состава легкой и тяжелой фракции отложений (80 проб), а также силикатного анализа (74 пробы).

Содержания наиболее распространенных тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Co) валовых проб и специально выделенной пелитовой фракции в лаборатории определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2АТ».

Гранулометрический состав определялся ситовым, пипеточным и комбинированным методами. Определение минерального состава частиц песчано-алевритовой размерности осуществлялось под бинокулярным микроскопом после отмучивания осадка и обработки иммерсионными препаратами с последующим делением на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции. Содержание породообразующих оксидов определяли традиционным методом силикатного анализа.

Изучение ассоциации аутигенных минералов железа (магнетита, пирита, гидроокислов железа) выполнено в «Центре исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы Tescan) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT (под руководством Ю.В. Попова).

Для изучения процессов вторичного загрязнения речных вод проведен ряд лабораторных экспериментов по изучению взаимодействия речных вод и донных отложений для рек бассейна Северского Донца. Подготовленные системы «донные отложения – вода» подвергались механическому перемешиванию, имитирующему взаимодействие фаз. Содержание тяжелых металлов в воде анализировалось до и после проведения эксперимента, содержание элементов в осадке – однократно. Различия в содержании металлов в воде до и после эксперимента явно указывает на их способность к десорбции из речных осадков.

Исследование временной изменчивости содержания элементов и уровней загрязненности донных отложений производилось в отдельных створах бассейнов рек Северский Донец и Тузлов. По вертикальному разрезу донных отложений определены содержания 9 металлов (Fe, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Co, Sr) и основных породообразующих оксидов. Анализ литературных данных позволил установить ориентировочную скорость осадконакопления в пределах района исследования, что позволило сопоставить изменение содержаний элементов и уровней загрязненности осадков с хронологией воздействия техногенных шахтных вод на поверхностные воды рек Восточного Донбасса.

Отдельное внимание в данной главе уделено анализу существующих подходов к оценке уровня загрязненности донных отложений. Среди исследователей донных отложений наиболее часто используемыми показателями уровня загрязненности донных отложений являются суммарный показатель загрязнения (Z_C) Ю.Е. Саета и Е.П. Янина, степень загрязнения (C_d) Л. Хокансона (Håkanson, 1980) и индекс геоаккумуляции (I_{geo}) Г. Мюллера (Muller, 1969).

На основе анализа российского и международного опыта оценки уровней загрязненности донных отложений, а также с учетом специфики объекта исследований была разработана усовершенствованная методика оценки уровня загрязненности донных отложений рек, которая основывается на следующих принципах.

1. Работа с однородным материалом – пелитовой фракцией ($< 0,01$ мм) донных отложений.

2. Использование кларков глин и глинистых сланцев (Григорьев, 2009) в качестве геохимического фона.

3. Учёт класса опасности элемента в окружающей среде.

4. Учёт потенциального риска вторичного загрязнения воды.

Еще одним важным аспектом при оценке загрязненности донных осадков с использованием интегрального показателя должно являться определение набора типоморфных элементов донных отложений – ассоциации элементов, для которых коэффициент концентрации принимает значения более 1,5. Соответственно, уровень аномальности содержания элемента напрямую зависит от величины коэффициента концентрации.

Исходя того, что число типоморфных элементов для различных источников будет отличаться, при расчете индекса уровня загрязнённости необходимо учитывать именно среднее арифметическое коэффициентов концентрации элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

Учитывая указанные выше принципы, формула интегрального показателя загрязнённости донных отложений (ИПЗ_{до}) выражается следующим образом (1):

$$\text{ИПЗ}_{\text{до}} = \log_{10}(PF) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_c \cdot K_T}{n}, \quad (1)$$

где K_T – коэффициент опасности элемента; K_C – коэффициент концентрации элемента (отношение содержания элемента в пробе к его фоновому (кларковому) содержанию); n – число типоморфных элементов, PF – доля пелитовой фракции, % (Решетняк В. и др., 2022).

Классы опасности элементов, как и ПДК, для донных отложений рек не разработаны, поэтому можно опираться на классы опасности элементов для вод разных категорий назначения, либо по общему воздействию элементов на живые организмы. Общепринятым подходом для оценки загрязненности водных систем является использование ПДК металлов в воде, разработанные для рыбохозяйственных водоёмов (Даувальтер, 2005) поэтому логичным будет и выбор соответствующих классов опасности элементов.

Наилучшим образом зависимость содержания элементов в донных отложениях от доли пелитовой фракции описывается логарифмическим законом.

Поэтому коэффициент содержания пелитовой фракции в итоговой формуле будет иметь вид $\log_{10}(PF)$, где PF – доля пелитовой фракции, %.

Для ИПЗ_{ДО} нами была разработана оценочная шкала, основанная на сопряжённом анализе результатов наших исследований (Закруткин и др., 2016; Zakrutkin et al., 2020). В таблице 1 показана итоговая оценочная шкала ИПЗ_{ДО}.

Таблица 1 – Оценочная шкала уровня загрязнённости донных отложений рек по ИПЗ_{ДО} (Решетняк В. и др., 2022)

Диапазон значений	Характеристика уровня загрязнённости
[0; 3,5)	Слабый
[3,5; 7,0)	Умеренный
[7,0; 14,0)	Высокий
[14,0; +∞)	Экстремально высокий

Основными отличительными чертами предлагаемого нами ИПЗ_{ДО} является учет доли пелитовой фракции и класса опасности типоморфных элементов, что позволяет отразить не только уровень накопления загрязнителей в донных отложениях, но и опасность вторичного загрязнения водной толщи материалом донных отложений.

3 ЛИТОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Донные отложения рек Восточного Донбасса внешне представляют собой осадки от светло-серого до черного цвета, иногда с коричневатым оттенком. Многие из них имеют полужидкую консистенцию с большим количеством разлагающегося органического вещества современного происхождения. По гранулометрическому составу речные отложения представлены слабо дифференцированным материалом и значительно различаются в пределах речных бассейнов: от пелитовых илов с выходом пелитовой фракции более 90% до алевроито-песчаных осадков.

Для донных отложений крупной реки Северский Донец доля песчано-алевритовой фракции составляет в среднем 87 %, в средних реках (Калитва, Быстрая, Кундрючья) на эту фракцию приходится 65 % осадка, а в малых реках и того меньше – 31 %. Соответственно, изменяются и содержания основных минералов легкой фракции. Речные осадки бассейна Тузлова характеризуются более высокими значениями выхода пелитовой фракции и содержанием её основных компонентов: глинистого вещества, кальцита и органического вещества современного происхождения.

Для тяжелой фракции речных отложений Восточного Донбасса, как показывают исследования (Закруткин и др., 2022; 2023), наиболее характерными минералами являются ильменит, гидроокислы железа и магнетит, которые встречаются практически повсеместно.

Гидроокислы железа в донных отложениях рек на первом этапе формируют рентгеноаморфные агрегаты ферригидрита в виде налетов, пленок и волокнистых форм. При дальнейшей дегидратации и понижении окислительно-восстановительного потенциала ферригидрит, как известно, трансформируется в гидрогетит, гётит, гематит и далее в магнетит (Закруткин и др., 2023). В исследованиях (Закруткин и др., 2022; 2023) показано, что между содержаниями гидроокислов железа и других аутигенных минералов железа в донных отложениях существует обратная зависимость с высоким значением коэффициента корреляции. Из этого можно предположить, что аутигенные минералы железа (магнетит, пирит) формируются главным образом за счет присутствующих в осадке техногенных гидроокислов железа.

Магнетит, второй по распространенности аутигенный минерал тяжелой фракции, «в донных отложениях рек Восточного Донбасса ... встречается в виде хорошо сохранившихся, незамещённых кристаллов размером 3-4 мкм, либо их агрегатов. Кроме того, присутствуют агрегаты более мелких зерен магнетита, сцементированные глинистыми частицами. Основная форма выделения минерала октаэдрическая, реже – ромбододекаэдрическая» (рисунок 1) (Закруткин и др., 2023, с. 110).

4 ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

4.1 Петрохимическая характеристика донных отложений рек

Установлено, что основными компонентами донных отложений рек Восточного Донбасса являются SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и Fe_2O_3 , также до 20% осадка приходится на потери при прокаливании, являющиеся показателем содержания органического вещества в осадке. Крупные реки от малых заметно отличаются по содержанию основных породообразующих оксидов, прежде всего, SiO_2 . На основе данных о содержании основных породообразующих оксидов в осадках рек Восточного Донбасса проведено определение состава глинистого вещества, главным компонентом которого во всех створах является гидрослюда, причем со значительной примесью монтмориллонита либо каолинита.

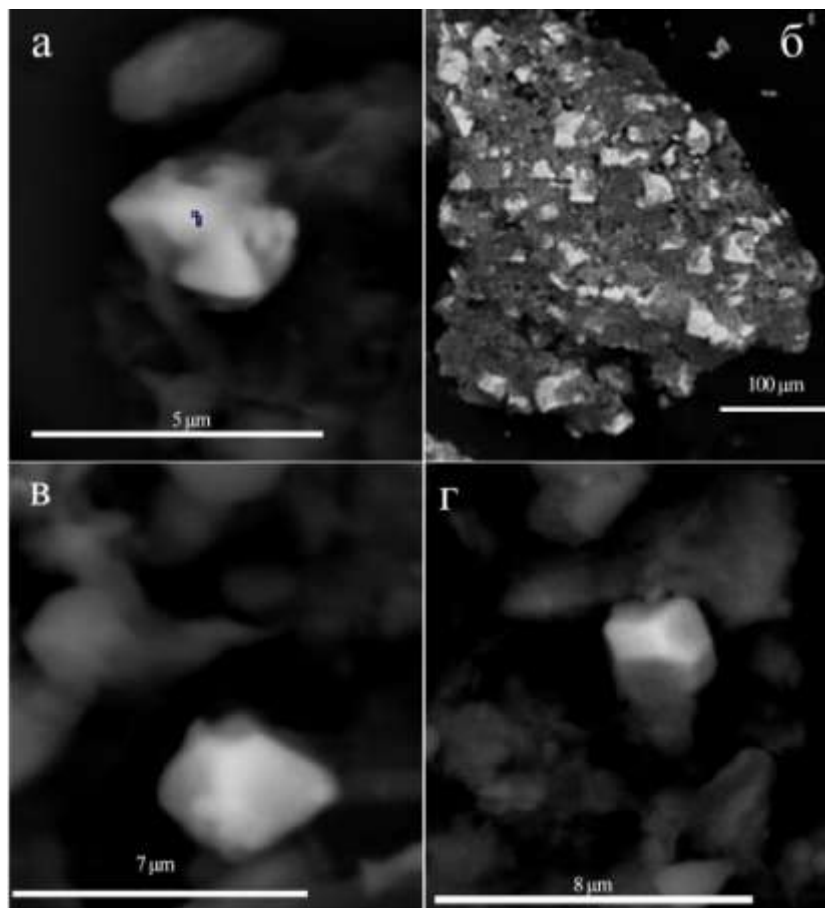


Рисунок 1 – Формы выделений магнетита в донных отложениях рек Восточного Донбасса (Закруткин и др., 2023):

а – агрегат кристаллов магнетита; б – мелкие зерна магнетита, сцементированные глинистыми частицами; в – октаэдрический кристалл магнетита; г – ромбодэкаэдрический кристалл магнетита

4.2 Распределение тяжелых металлов в донных отложениях рек

Среди тяжелых металлов наибольшими содержаниями в валовых пробах донных отложений характеризуются железо и марганец; концентрации остальных металлов, как и в водной среде, на 1-2 порядка ниже. По степени превалирования содержания для бассейна Северского Донца металлы можно расположить в следующей последовательности: $Fe > Mn > Cr > Zn > Ni > Cu > Co > Pb$. Для бассейна Тузлова ряд металлов выглядит так: $Fe > Mn > Cr > Zn > Ni > Cu > Pb > Co$.

Оценка содержания металлов в донных отложениях проводилась на основе величин коэффициентов концентрации K_c для содержаний элементов в пелитовой фракции донных отложений и валовой пробе. Для донных отложений рек бассейна Северского Донца в целом характерно накопление свинца и никеля в пелитовой фракции ($Pb_{2,3} Ni_{2,1}$), а для осадков в бассейне Тузлова – хрома, свинца и никеля ($Cr_{2,3} Pb_{2,2} Ni_{1,6}$). Выявлено, что в отложений рек ряд элементов в отдельных случаях связан с минералами тяжелой фракции (ильменит, магнетит, гидроокислы железа). Уровень загрязненности донных отложений рек бассейна

Тузлова как по значениям коэффициентов концентрации, так и по числу типоморфных элементов несколько выше, чем в бассейне Северского Донца, что вызвано различным уровнем воздействия угледобывающей промышленности в указанных бассейнах.

4.3 Интегральная оценка загрязненности донных отложений рек

По результатам оценки большую часть участков рек можно классифицировать как умеренно загрязнённые. Как и в случае с суммарным показателем загрязнения, по ИПЗ_{ДО} для донных отложений рек бассейна Северского Донца в целом характерен более низкий уровень загрязненности, чем для рек бассейна Тузлова (Zakrutkin et al., 2020). Высокий уровень загрязнённости отмечен для створа 21 реки Большой Несветай, створа 29 реки Аюта и створа 39 реки Тузлов; а также для створа 5 реки Малая Каменка и створа 14 реки Большая Гнилуша (рисунок 2). Среди этих створов наибольшее значение показателя характерно именно для верхнего створа реки Аюта за счет наибольшего коэффициента концентрации свинца – элемента II класса опасности с коэффициентом 1,2. Результаты оценки приведены на картосхеме (рисунок 2).

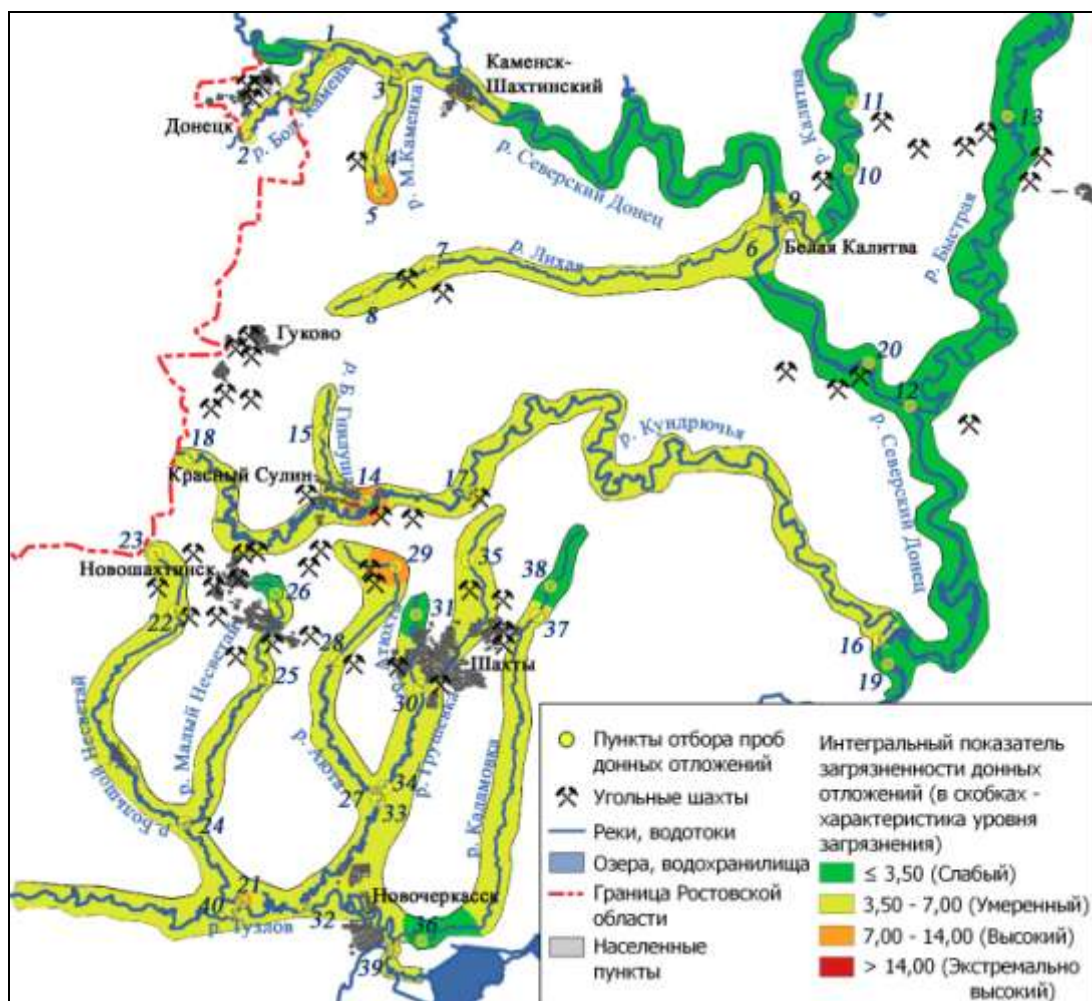


Рисунок 2 – Картосхема интегрального показателя загрязненности донных отложений (ИПЗ_{ДО}) рек Восточного Донбасса (составлено автором)

4.4 О роли техногенных шахтных вод в формировании химического состава донных отложений рек

В данном разделе рассматриваются техногенные шахтные воды как фактор формирования химического состава донных отложений рек. Показано, что в створах, расположенных ниже сброса техногенных шахтных вод отмечается увеличение содержания пелитовой фракции и глинистых минералов. При этом содержания органического вещества современного происхождения сохраняются примерно на одном уровне (12-13 % пробы). Среди основных минералов тяжелой фракции содержания магнетита и гидроокислов железа в осадках створов, расположенных ниже выхода техногенных шахтных вод, практически в два раза выше, чем в осадках верхних створов. В устьевых створах содержания указанных минералов еще ниже (рисунок 3).

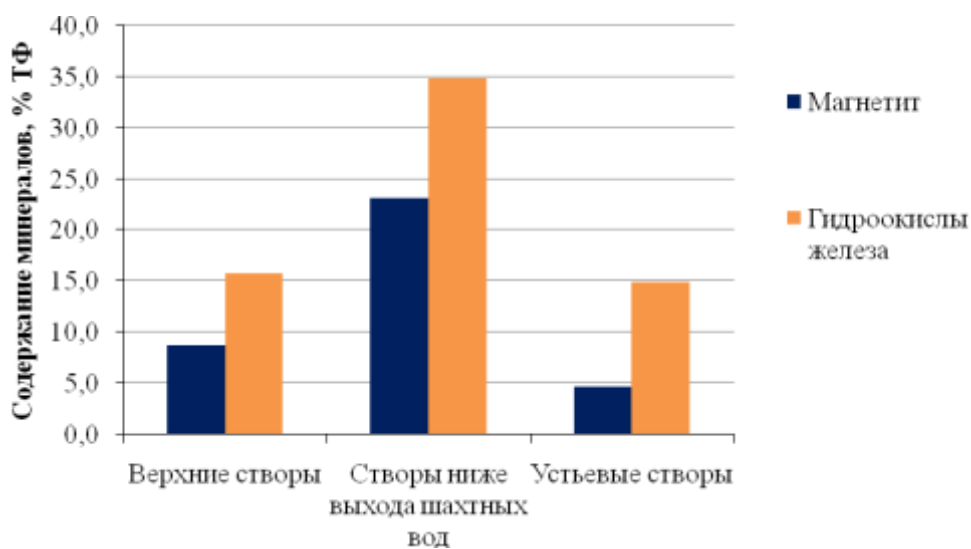


Рисунок 3 – Распределение аутигенных минералов тяжелой фракции донных отложений рек Кадамовка, Быстрая, Калитва, Малая Каменка и Кундрючья в зависимости от группы створов (составлено автором)

Схожим образом поступающие в речную сеть шахтные воды воздействуют на химический состав донных отложений изучаемых рек. Как показано в работе (Закруткин, Решетняк В., 2023), в составе речных осадков на участках, расположенных ниже сброса техногенных шахтных вод, отмечаются повышенные содержания железа как в валовой пробе, так и в пелитовой фракции. Причем наибольший эффект воздействия наблюдается в непосредственной близости от источника (в пределах 100 м). Во многих случаях такая закономерность прослеживается и для остальных элементов, наиболее типичных для шахтных вод региона.

Для бассейнов Северского Донца и Тузлова набор типоморфных элементов в воде и донных отложениях рек во многом сходится с набором типоморфных элементов шахтных вод (рисунок 4).

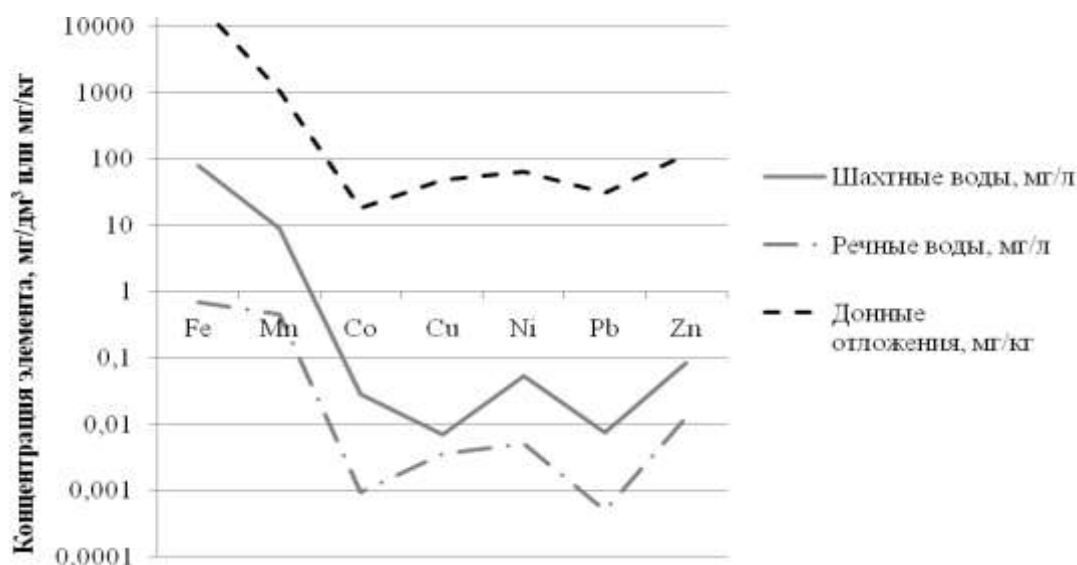


Рисунок 4 – Геохимические спектры шахтных вод, речных вод и донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Таким образом, шахтные воды Восточного Донбасса характеризуются широким набором металлов с аномальными содержаниями. Попадая в речную сеть, ряд элементов продолжает миграцию в поверхностных водах, а значительная часть попадает в донные отложения, формируя полиэлементные геохимические аномалии. С учетом сходства наборов типоморфных элементов шахтных вод и донных отложений рек можно сделать вывод о существенном влиянии угледобывающей промышленности на химический состав и уровень загрязненности речных осадков в исследуемом районе.

4.5 Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод

На основе результатов расчета накопленной массы элементов в донных осадках удалось выявить, что для донных отложений рек бассейна Северского Донца значения накопленной массы железа, марганца, цинка и хрома выше, чем для бассейна Тузлова; содержания меди и никеля, в целом, сопоставимы; кобальта и свинца – ниже (Закруткин и др., 2020; Решетняк В., Закруткин, 2020).

Среди рек бассейна Тузлова наибольшими значениями накопленной массы характеризуются донные отложения рек Тузлов, Большой и Малый Несветай, наименьшими – Аюта и Атюхта. В пределах бассейна Северского Донца наибольшая накопленная масса всех элементов наблюдается в донных отложениях рек Большая Каменка. Повышенные содержания накопленной массы металлов отмечены для рек Кундрючья, Лихая и Большая Гнилуша.

Для оценки роли донных отложений как источника вторичного загрязнения водной среды авторами работы (Решетняк О., Закруткин, 2016) проведена серия лабораторных экспериментов по изучению взаимодействия речных вод и донных отложений рек бассейна Тузлова. С учетом различия природно-климатических особенностей и уровня техногенной нагрузки на реки двух бассейнов, выполнена серия аналогичных лабораторных экспериментов для рек бассейна Северского Донца. Результаты данного эксперимента показали, что по направленности процессов сорбции-десорбции на границе раздела фаз «вода – донные отложения» исследуемые металлы можно разделить на две группы.

При взмучивании первая группа металлов Mn, Cu, Zn характеризуется десорбцией из донных отложений в водный раствор и достижением наибольшей концентрации металла в воде через 10 мин или 1 ч с последующим установлением равновесной концентрации металла. Fe и Cr объединены во вторую группу металлов, концентрации которых в водном растворе в ходе эксперимента остаются практически постоянными или снижаются.

На основе данных расчета накопленной массы и проведенного лабораторного эксперимента для рек бассейнов Тузлова и Северского Донца определены массы элементов, которые потенциально, при определенных условиях, способны переходить в водную толщу. Таким образом, выделены участки рек с наиболее неблагоприятной обстановкой с точки зрения опасности вторичного загрязнения воды материалом донных отложений: в бассейне Тузлова – это участки рек Тузлов, Большой и Малый Несветай; в бассейне Северского Донца – это участки рек Большая Каменка, Лихая, Кундрючья и Большая Гнилуша.

5 ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Для изучения распределения содержаний элементов и уровней загрязненности донных отложений с глубиной выбраны 4 участка рек. Внешне и в разрезе пробы характеризуются однородной структурой и текстурой. Анализ распределения элементов по глубине показал, что пелитовая фракция донных осадков, как правило, характеризуется большими содержаниями металлов, чем валовая проба. Так, например, концентрация свинца и кобальта в пелитовой фракции 1,5-2,0 раза больше, чем в общем объеме пробы, в то время как содержания хрома примерно сопоставимы.

С точки зрения временных тенденций изменчивости содержания элементов и уровня загрязненности донных отложений выделены следующие особенности. Для осадков рек Керета и Малая Каменка содержания большинства элементов с глубиной изменяются незначительно (рисунок 5). Наибольшие вариации концентраций отмечены для Pb в осадках Малой Каменки и Pb, Mn, Ni в осадках

реки Керета. Для всех из них, кроме Ni, наблюдается тенденция снижения с глубиной. И если створ на реке Керета, притоке Большого Несветая, можно считать условно фоновым, то устьевой створ реки Малая Каменка будет отражать суммарное воздействие на водосбор. При этом оба створа закладывались на удалении от выходов техногенных шахтных вод и породных отвалов.

Напротив, для осадков рек Большая Гнилуша и Атюхта максимальные содержания элементов приурочены к глубинам 20-30 см и 25-35 см соответственно, после чего наблюдается их снижение (рисунок 5). При этом по абсолютным концентрациям металлов осадки реки Атюхта превосходят отложения других изученных рек, так как створ расположен в зоне влияния шахты им. Красина (Гибков и др., 2023).

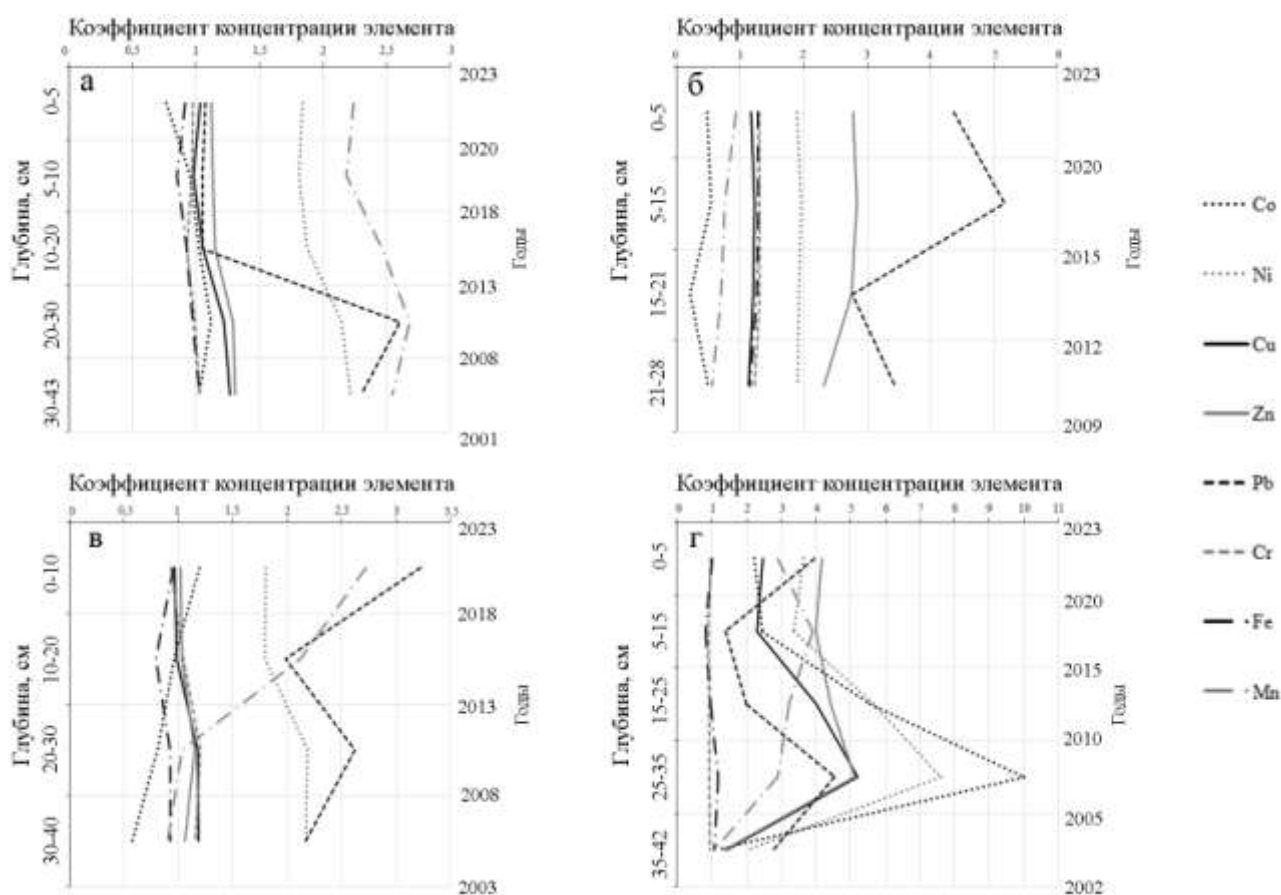


Рисунок 5 – График распределения содержания металлов в донных осадках реки Большая Гнилуша (а), Малая Каменка (б), Керета (в), Атюхта (г) с глубиной (составлено автором)

Наибольший уровень загрязненности донных осадков по ИПЗ_{до} (умеренный и высокий) отмечается в пределах устьевого створа реки Атюхта, где наблюдается наибольший набор элементов с аномальными содержаниями. Самое высокое значение показателя наблюдается на глубине 25-35 см. Среди рассматриваемых

рек только для донных отложений Малой Каменки наибольший уровень загрязнения по ИПЗ_{до} наблюдается в подповерхностном слое, и в целом отмечена тенденция к снижению с глубиной. Уровень загрязненности осадков реки Керета и Большая Гнилуша изменяется в небольших пределах, от слабого до умеренного, причем максимальное значение ИПЗ_{до} приходится на интервал глубин 20-30 см.

Стоит отметить, что в осадках различных створов для разного набора элементов максимальные содержания металлов отмечаются на глубине от 20 до 35 см. Это указывает на то, что данному слою осадка соответствует определенный временной период, в течение которого привнос элементов в речные воды и донные отложения был заметно повышен.

Для того, чтобы выявить этот временной интервал, для которого характерно было максимальное накопление металлов, необходимо оценить скорость осадконакопления в изучаемых реках. Исследования малых и средних рек европейской части России указывают на то, что скорость осадконакопления отличается для рек разного размера и с разной степенью распаханности водосбора. Так, для малых рек степной зоны с преобладанием распаханых земель на водосборе скорость накопления аллювия может достигать 2,5-3,0 см/год (Бутаков и др., 2000). Авторы работы (Маркелов и др., 2012) выявили снижение темпов аккумуляции наносов в последние 30-40 лет в связи с изменением климата, уменьшением площади пахотных земель на водосборах, а также строительством плотин и водохранилищ, что в той или иной степени характерно и для речных водосборов Восточного Донбасса. С учетом того, что для исследуемых рек на период весеннего половодья приходится от 60 до 80 % годового стока, скорости накопления пойменного аллювия сопоставимы со скоростями осадконакопления исследуемых рек в целом. Исходя из этого за среднюю скорость осадконакопления для рек Восточного Донбасса принято значение 2,0 см/год. В таком случае, глубине донных осадков 35 см будет соответствовать 2005 год, а 20 см – 2013 год.

В работе А.И. Гавришина (Гавришин, 2014) приводится анализ изменчивости объемов сбрасываемых шахтных вод и выноса растворенных веществ, включая соединения железа и сульфаты. Несмотря на то, что наибольший объем сбрасываемых шахтных вод отмечался в 1992 г., объем выноса ими растворенных веществ, железа и сульфатов на поверхность достиг максимальных значений в период с 2006 по 2010 год, превышая показатели периода до ликвидации угольных шахт. Тем самым, наблюдаемые максимальные содержания металлов и уровни загрязненности донных отложений по вертикальному разрезу соответствуют периоду наибольшего воздействия на реки Восточного Донбасса техногенных шахтных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования сформулированы следующие выводы.

1. Территория Восточного Донбасса является природно-техногенной геохимической провинцией, в пределах которой геологические и физико-географические условия в сочетании с существующими здесь техногенными факторами, обусловленными, прежде всего, размещением и функционированием предприятий угледобывающей промышленности, способствуют формированию полиэлементных геохимических аномалий во всех компонентах окружающей среды, в особенности в поверхностных и подземных водах. Сформированные аномалии в природных средах, и особенно в донных осадках, являются неоднородными как в пространственном отношении, так и по степени проявления природных и техногенных факторов. Эколого-геохимические особенности донных отложений являются надежным индикатором техногенного воздействия на речные воды.

2. На основе анализа существующих методик и подходов к оценке уровня загрязненности донных отложений водных объектов автором сформулированы принципы оценки и предложена формула интегрального показателя загрязненности донных отложений (ИПЗ_{ДО}). Основным отличием предлагаемого нами показателя является учет доли пелитовой фракции и класса опасности типоморфных элементов, что позволяет отразить не только уровень накопления загрязнителей в донных отложениях, но и опасность вторичного загрязнения водной толщи материалом донных отложений. Показано, что среди показателей степени загрязненности донных отложений предлагаемый в настоящей работе ИПЗ_{ДО} в большей степени отражает уровень загрязненности речных вод, и, следовательно, обладает лучшими индикаторными свойствами.

3. Донные отложения рек Восточного Донбасса представлены слабо дифференцированным псаммит-алеврит-пелитовым материалом с большим количеством разлагающегося органического вещества современного происхождения. Минеральный состав легкой фракции речных осадков четко зависит от категории и водности реки: чем крупнее река и чем выше водность, тем ниже в её донных осадках содержания пелитовой фракции и её основных компонентов. При этом влияние техногенных шахтных вод на донные отложения рек проявляется в увеличении доли глинистых частиц пелитовой фракции. Что касается тяжелой фракции речных осадков, то её основными компонентами являются ильменит, гидроокислы железа и магнетит. При этом ильменит – основной терригенный минерал, и его содержание в большей степени зависит от природных факторов. Гидроокислы железа, поступающие в донные осадки с техногенными шахтными водами, являются основным источником железа, необходимым для формирования аутигенных магнетита и пирита. Выявлено, что

участки рек, расположенные ниже выхода техногенных шахтных вод на поверхность, характеризуются повышенными содержаниями аутигенных гидроокислов железа и магнетита.

4. Основными компонентами донных отложений рек Восточного Донбасса являются SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и Fe_2O_3 , также до 20 % осадка приходится на потери при прокаливании, что характеризует содержание органического вещества. На основе данных о содержании основных породообразующих оксидов показано, что главным компонентом глинистого вещества во всех реках является гидрослюда, причем со значительной примесью монтмориллонита либо каолинита.

Для донных отложений рек бассейна Северского Донца в целом характерно накопление свинца и никеля в пелитовой фракции ($\text{Pb}_{2,3} \text{Ni}_{1,1}$), для осадков рек бассейна Тузлова – хром, свинец и никель характеризуются аномальными содержаниями ($\text{Cr}_{2,3} \text{Pb}_{2,2} \text{Ni}_{1,6}$). В отдельных случаях выявлено, что в речных осадках ряд элементов связан с минералами тяжелой фракции (ильменит, магнетит, гидроокислы железа). В целом, уровень загрязненности донных отложений рек бассейна Тузлова как по значениям коэффициентов концентрации, так и по числу типоморфных элементов несколько выше, чем у рек бассейна Северского Донца, что обусловлено различным уровнем воздействия угледобывающей промышленности в указанных бассейнах.

5. Результаты расчета интегрального показателя загрязненности донных отложений позволили установить, что в целом донные осадки рек Восточного Донбасса характеризуются как умеренно загрязнённые. Тем не менее, некоторые створы рек имеют более высокий уровень загрязнённости донных осадков.

Повышение уровня загрязненности донных отложений на отдельных участках рек изучаемых бассейнов связано с влиянием техногенных шахтных вод и объектов угольной отрасли в целом. Шахтные воды на территории Восточного Донбасса характеризуются широким набором металлов с аномальными содержаниями. Попадая в речную сеть, часть элементов продолжают миграцию в поверхностных водах, другая – попадает в донные отложения, формируя полиэлементные геохимические аномалии. С учетом сходства наборов типоморфных элементов шахтных вод и донных отложений рек можно сделать вывод о существенном влиянии угледобывающей промышленности на химический состав и уровень загрязненности речных осадков в исследуемом районе.

6. На основе расчета накопленной массы элементов в донных отложениях и данных лабораторного эксперимента по изучению поведения металлов в системе «донные отложения – вода» определены количества элементов, которые потенциально доступны для перехода в речную воду, и выделены участки рек с наиболее неблагоприятной обстановкой с точки зрения опасности вторичного

загрязнения: в бассейне Тузлова – это участки рек Тузлов, Большой и Малый Несветай; в бассейне Северского Донца – участки рек Большая Каменка, Лихая, Кундрючья, Большая Гнилуша.

7. Изучение временной изменчивости содержания элементов (по вертикальному разрезу) в донных отложениях показало, что степень техногенного воздействия на изучаемые реки имеет различную динамику. Верхний слой осадков (0-10 см) рек Большая Гнилуша и Атюхта характеризуются более низкими содержаниями элементов и уровнем загрязнения, чем отложения на интервале глубин 20-30 и 25-35 см. Во многом уровень загрязненности осадков на этих участках рек обусловлен влиянием высокоминерализованных техногенных шахтных вод. С учетом средней скорости осадконакопления малых и средних рек степной зоны (около 2,0 см/год), сделан вывод о том, что наблюдаемые максимальные содержания металлов и уровни загрязненности донных отложений по вертикальному разрезу соответствуют периоду наибольшего воздействия объектов угледобывающей промышленности на реки Восточного Донбасса.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для комплексной оценки степени загрязненности рек Юга России, для прогнозных оценок изменения качества водных ресурсов, для разработки единой водоохраной стратегии, предусматривающей совместное использование, управление и охрану речных и подземных вод Восточного Донбасса в пределах Ростовской области – густонаселенном регионе с напряженной водохозяйственной ситуацией и широким спектром экологических проблем.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертации опубликовано 26 научных работ. Ниже перечислены основные наиболее значимые работы.

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Современный химический состав и тенденции пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса / В. Е. Закруткин, О. С. Решетняк, Г. Г. Бабаян [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2017. – № 2(194). – С. 101-109. К2.

2. Эколого-геохимические особенности донных отложений рек Восточного Донбасса / Е. В. Гибков, В. Е. Закруткин, **В. Н. Решетняк**, О. С. Решетняк // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2020. – № 1(205). – С. 36-46. – DOI 10.18522/1026-2237-2020-1-36-46. К2.

3. Zakrutkin, V. E. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia) / V. E. Zakrutkin,

V. N. Reshetnyak, O. S. Reshetnyak // *Water and Ecology*. – 2020. – No. 3(83). – P. 32-40. – DOI 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40.

4. **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. – № 3(215). – С. 91-102. – DOI 10.18522/1026-2237-2022-3-91-102. К2.

5. Техногенные шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на микроэлементный состав речных вод и донных отложений / Е. В. Гибков, В. Е. Закруткин, Г. Ю. Скляренко, **В. Н. Решетняк** // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. – 2023. – № 4(220). – С. 79-90. – DOI 10.18522/1026-2237-2023-4-79-90. К2.

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

6. 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. – DOI 10.31857/S2587556620020168.

7. 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 Российской академии наук. Серия географическая*. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 554-564. – DOI 10.31857/S2587556621040130.

8. Закруткин, В. Е. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области) / В. Е. Закруткин, Е. В. Гибков, **В. Н. Решетняк** // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 19-34. – DOI 10.46698/VNC.2022.20.40.002.

9. **Решетняк, В. Н.** Интегральная оценка техногенного загрязнения речных отложений углепромышленной территории Восточного Донбасса / В. Н. Решетняк, В. Е. Закруткин, Е. В. Гибков // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2022. – № 4. – С. 80-87. – DOI 10.25750/1995-4301-2022-4-080-087.

10. Закруткин, В. Е. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса / В. Е. Закруткин, **В. Н. Решетняк** // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 85-98. – DOI 10.46698/VNC.2023.89.38.007.

11. Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса / В. Е. Закруткин, **В. Н. Решетняк**, Е. В. Гибков, Г. Ю. Скляренко // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 102-119. – DOI 10.46698/VNC.2023.95.74.008.