

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**РЕШЕТНЯК ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ**

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

1.6.21. Геоэкология (географические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор **Закруткин Владимир Евгеньевич**

Ростов-на-Дону – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Восточный Донбасс как природно-техногенная геохимическая аномалия .....	16
1.1 Геологическое строение и рельеф.....	17
1.2 Климатические условия.....	21
1.3 Почвенный покров .....	22
1.4 Поверхностные и подземные воды .....	25
1.5 Воздействие угледобывающей промышленности на природные среды Восточного Донбасса.....	29
1.6 Восточный Донбасс как природно-техногенная геохимическая региональная аномалия .....	37
2 Материалы и методы исследований.....	43
2.1 Материалы исследования.....	43
2.2 Методика исследования .....	45
2.3 На пути к разработке интегрального показателя загрязненности донных отложений водных объектов техногенно преобразованных территорий.....	49
3 Литолого-минералогическая характеристика донных отложений .....	65
4 Эколого-геохимическая оценка донных отложений рек Восточного Донбасса.....	81
4.1 Петрохимическая характеристика донных отложений рек .....	81
4.2 Распределение тяжелых металлов в донных отложениях рек .....	88
4.3 Интегральная оценка загрязненности донных отложений рек .....	115

4.4 О роли техногенных шахтных вод в формировании химического состава донных отложений рек .....	120
4.5 Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод .....	132
5 Временная изменчивость содержания элементов и уровней загрязненности донных отложений .....	141
Заключение .....	153
Список используемой литературы .....	157

## ВВЕДЕНИЕ

**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 [27, 61, 114].

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 [39, 61]. 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 [17, 42]. 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 [12, 71].

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 [13, 14]. С ними в реки поступает огромное количество сульфатов и тяжелых металлов, среди которых соединения железа, марганца, стронция, меди и др. [14, 42, 84, 119]. При этом меняется химический состав не только воды, но и донных отложений, также происходит преобразование минерального состава донных 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 [42].

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, O. Oyewumi и др.), изучение которых имеет свою специфику.

Отдельно стоит выделить работы, посвященные выявлению закономерностей распределения веществ в системе «донные отложения – вода» (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.).

Одним из первых фундаментальных обобщений российской литературы в области эколого-геохимического изучения территорий в части миграционных процессов распространения элементов в различных природных системах является монография «Геохимия окружающей среды», подготовленная коллективом авторов во главе с Ю.Е. Саэтом. В ней продемонстрирована важнейшая роль

техногенных факторов в формировании минерального и химического составов донных отложений.

Вопросы геохимии донных отложений малых рек и их техногенного загрязнения весьма подробно рассмотрены в работах Е.П. Янина. Так, методы выявления и оценки техногенных аномалий, представленные в работах Янина, служат для выражения относительной распространенности химического элемента, которую автор предлагает оценивать по коэффициентам концентрации ( $K_C$ ) химических элементов, формулам геохимической ассоциации. Уровень загрязненности донных отложений оценивается с помощью суммарного показателя загрязнения  $Z_C$ .

Экологические проблемы, возникающие при ликвидации предприятий угольной промышленности, хорошо освещены Н.Г. Максимовичем на примере Кизеловского угольного бассейна. Подчеркивается важная роль шахтных вод в формировании химического состава рек, отдельное внимание также уделено геохимии донных отложений.

Вопросами экологических проблем Восточного Донбасса начали заниматься более 30 лет назад. В книге В.В. Приваленко [83] дается комплексная эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды городов Ростовской области, включая Каменск-Шахтинский и Шахты, Красный Сулин, Зверево. В исследовании анализируются содержания загрязняющих веществ в атмосферных выпадениях, почве, воде и донных отложениях, приводится характеристика основных источников загрязнения природных сред.

В монографии «Геохимия аквальных ландшафтов» А.Д. Хованского [114] приведены результаты комплексного геохимического исследования ряда водных объектов, включая р. Северский Донец. Основное внимание уделено выделению типов ландшафтов по особенностям биогенной и физико-химической миграции, а также в зависимости от типа осадка, на котором формируются изучаемые ландшафты. Автором приводятся средние содержания микроэлементов в воде и донных отложениях реки в пределах разного типа ландшафтов. Анализируется

изменение гидрохимического режима речных вод и состава донных отложений рек Северский Донец и Дон под влиянием техногенных источников.

Комплексное изучение состояния окружающей среды в пределах Восточного Донбасса проводилось в рамках работы по Экологическому Атласу Ростовской области, вышедшем в 2000 году под редакцией В.Е. Закруткина. В этой работе дается характеристика природно-экономических особенностей территории, антропогенной нагрузки на неё, загрязнения и деградации природных сред, демографической обстановки и состояния здоровья населения. Восточный Донбасс в целом попадает в рамки территории, характеризующейся «кризисным» уровнем экологической обстановки.

В то же время появляется ряд работ, посвященных основным экологическим проблемам Восточного Донбасса. Вопросы химического состава шахтных и подземных вод Восточного Донбасса с начала 2000-х годов освещены в работах профессора ЮРГПУ (НПИ), д.г.-м.н. А.И. Гавришина. В работах Мохова [70 - 72] подробно описаны последствия затопления ликвидированных шахт Восточного Донбасса: как непосредственно геоэкологические проблемы, вызванные загрязнением поверхностных и подземных вод, так и изменение гидродинамических условий среды.

В работах, выполненных под руководством Ю.А. Федорова [15, 112, 113], освещаются вопросы состояния донных отложений водных объектов Юга России, в том числе и малых рек Восточного Донбасса. Рассмотрены особенности содержания метана и сероводорода в осадках, распределение ртути и других металлов в зависимости от различных факторов.

Сотрудниками кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле ЮФУ под руководством В.Е. Закруткина [42] проводились комплексные исследования водных ресурсов Восточного Донбасса. В этих исследованиях авторы неоднократно показывают, что речные воды в пределах техногенно преобразованных территорий подвержены комплексному воздействию предприятий угледобывающей промышленности: действующих и ликвидированных шахт, терриконов и отвалов. Особый акцент сделан на

загрязнении малых рек, которые характеризуются невысокой способностью к самоочищению и потому будут наиболее уязвимы в условиях подобного воздействия. Изменения в составе речных вод проявляются в увеличении минерализации, содержания макро- и микрокомпонентов. Помимо изучения поверхностных и подземных вод изучался химический и минералогический состав донных отложений рек бассейнов Северского Донца и Тузлова во взаимосвязи с химическим составом и качеством водной среды.

Ключевые вопросы геохимии донных отложений водных объектов детально изложены и в работах зарубежных исследователей (L. Hakanson, G. Muller, D.C. Tomlison, U. Forstner, G.M.S. Abraham, O. Oyewumi, A.-M. 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. Особый вклад в проблему оценки донных отложений поверхностных водных объектов внес Хокансон [132], предложив методику оценки уровня загрязненности донных отложений по содержаниям семи приоритетных тяжелых металлов и полихлорированных дифенилов как наиболее опасных токсикантов. Особое внимание в работах Хокансона уделяется использованию фоновых (доиндустриальных) и кларковых значений, а также учету токсичности при оценке уровня загрязненности донных 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, И.И. Косинова, Е.П. Овчарова, Е.П. Янин, G.M.S. Abraham, W.H. Klemt, T.Nasrabadi и др.) [8, 53, 79, 125, 126, 136, 142].

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. Слуковского, Е.П. Янина, P.F. Avila, W.H. Klemt, G. J. León-García, J. Wang, J.Wei и др. [26, 39, 52, 106, 121, 127; 136, 137, 152, 153].

**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 на территории Восточного Донбасса природно-техногенной геохимически аномальной зоны.

2. Рассмотреть существующие методические подходы к оценке уровня загрязненности донных отложений рек и усовершенствовать методику оценки уровня загрязненности донных отложений 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 донных отложений рек.

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

**Научная новизна.** На основе анализа существующих методик предложен усовершенствованный интегральный показатель оценки уровня загрязненности донных отложений рек (ИПЗ<sub>до</sub>) Восточного Донбасса, который позволяет отразить не только уровень накопления загрязнителей 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 «донные отложения – вода» 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 как продолжение научной работы в рамках 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.), одним из исполнителей которого являлся автор. Собран и проанализирован большой массив данных о химическом и минералогическом составе донных отложений рек Восточного Донбасса.

Дополнительный материал для выполнения исследований 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)». Автор принимал участие на всех этапах полевых и камеральных работ.

Тематика исследования подразумевает собой изучение донных отложений исследуемого региона в различных аспектах, в связи с чем в процессе выполнения работы применялись методы из различных областей: геоэкологии, геохимии, гидрохимии, минералогии, аналитической химии и т.д. На всех этапах исследования полевые и лабораторные работы выполнялись в строгом соответствии с нормативными и руководящими документами, методическими указаниями.

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

Изучение ассоциации аутигенных микроминералов 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.

Оценка степени загрязненности донных отложений рек Восточного Донбасса проводилась на основе сформулированного в данной работе интегрального показателя загрязненности донных отложений (ИПЗ<sub>до</sub>). Основные принципы оценки и формула расчета, а также шкала оценки разработана с учетом существующих показателей загрязненности донных осадков (коэффициент концентрации и фактор загрязнения элементов; суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  [101, 123] и степень загрязнения  $C_d$  Хокансона [132]). В качестве фоновых значений используются кларки осадочных пород и глин и глинистых сланцев (по Н.А. Григорьеву) [23] для выявления аномальных содержаний элементов в валовых пробах и пелитовой фракции, соответственно.

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 содержаний элементов и уровней загрязненности донных отложений производилось в отдельных створах бассейнов рек Северский Донец и Тузлов, пробоотбор производился согласно [21, 24], проанализированы содержания 9 металлов и основных порообразующих оксидов. Анализ литературных данных позволил установить приблизительную скорость осадконакопления в пределах района исследования, что позволило сопоставить изменение содержаний элементов и уровней загрязненности осадков с динамикой воздействия шахтных вод на поверхностные воды Восточного Донбасса.

#### **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<sub>до</sub>, 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 их загрязненности 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 «донные отложения – вода» 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 международных базах данных Web of Science и Scopus), а также 15 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций.

Результаты исследования были представлены на 9 научных конференциях всероссийского и международного уровней: четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Москва, 15-18 сентября 2015); II Научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы наук о Земле», (Ростов-на-Дону, 27 октября 2016); второй практической конференции по вопросам реализации научных разработок (Москва, 25-26 октября 2017); 2019 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2019) (Hanoi, Vietnam, November 7 - 10, 2019); всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы и инновационные технологии в развитии географических наук» (Ростов-на-Дону, 2020); XXVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2020); XVII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2021); IV Международной научной конференции «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии)» («Опасные явления – IV») памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (Ростов-на-Дону, 2022); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы,

управление, мониторинг», 20–22 сентября 2023 г., г. Ростов-на-Дону (ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» и ФГБУ РосНИИВХ).

**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 и выводов, 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.

## **1 ВОСТОЧНЫЙ ДОНБАСС КАК ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ АНОМАЛИЯ**

Восточный Донбасс, расположенный на западе Ростовской области, представляет собой один из старейших угледобывающих регионов России. Угленосная площадь бассейна составляет более 30 тыс. км<sup>2</sup> и включает десять основных угленосных районов: Шахтинско-Несветайский, Сулино-Садкинский, Гуково-Зверевский, Краснодонецкий, Каменско-Гундоровский, Белокалитвенский, Тацинский, Задонский, Миллеровский и Цимлянский [33, 86, 110].

К вопросу изучения донных отложений рек Восточного Донбасса невозможно подойти, не охарактеризовав условия, в которых они формируются. В той или иной степени все компоненты окружающей природной среды оказывают влияние на вещественный и химический состав донных отложений рек. Особенности геологического строения территории и литологический состав пород определяют характер и морфологию рельефа местности, почвы и подстилающие их горные породы выступают источником различных элементов в ландшафте, в том числе и тяжелых металлов. Климатические особенности территории в совокупности с расчлененностью рельефа влияют на степень выраженности процессов водной и ветровой эрозии, интенсивность переноса веществ в пределах водосбора. В результате выветривания почв и горных пород эти вещества попадают в речные воды, где они либо продолжают свою миграцию с поверхностным стоком, либо аккумулируются в донных отложениях.

В последние годы к наиболее значимым факторам, определяющим геохимическую обстановку на водосборных площадях, можно отнести и деятельность человека. Не является исключением и территория Восточного Донбасса, где на протяжении последних 30 лет происходит интенсивное воздействие угледобывающей промышленности на все компоненты окружающей среды. Наиболее значимым последствием реструктуризации угольной промышленности Восточного Донбасса и ликвидации нерентабельных шахт стало возникновение высокоминерализованных техногенных шахтных вод, излив

которых в речные воды приводит к существенному изменению их химического состава. В конечном счете, поступающие с шахтными водами вещества оказываются в составе донных осадков. Таким образом, особенности химического состава донных отложений во многом отражают процессы перераспределения и миграции элементов в пределах водосборных площадей под влиянием природных и антропогенных факторов.

### **1.1 Геологическое строение и рельеф**

Территория Восточного Донбасса в тектоническом плане представлена Донецким выступом, который ограничен Северским Донцом на западе, Погруженным Донбассом (низовье рек Быстрая, Калитва, левобережье Северского Донца, бассейн Тузлова), Воронежской антеклизой на севере и Тузлов-Манычским прогибом на юге [16].

Восточный Донбасс представляет собой часть единого протяженного прогиба – Доно-Днепровского авлакогена, «сформировавшегося в теле Восточно-Европейской платформы между Украинским и Воронежским щитами в палеозойское (а может и более раннее) время, а также на ее краю перед Предкавказской герцинской геосинклиналью и складчатой областью» [110, с. 58]. В пределах Доно-Днепровского прогиба можно выделить западную и восточную части, к последней из которых относится складчатый Донбасс. Развитие этих частей значительно отличалось друг от друга.

«Восточная часть авлакогена заложилась одновременно с западной, но вблизи южного края Восточно-Европейской платформы она отделена от Кавказской геосинклинали сужающимся к востоку выступом дорифейских кристаллических пород. ... В орогенный период развития герцинской геосинклинали, начавшийся в середине раннего карбона, восточная часть Доно-Днепровского авлакогена продолжала оставаться областью осадконакопления, но уже перед воздымающейся и разрушающейся герцинской складчатой областью. Осадки карбона вышли далеко за пределы центрального грабена как на севере, так

и на юге, хотя южный борт был более узкий и крутой, а вблизи него накапливались отложения значительной мощности, перекрывая восточное продолжение Украинского щита, включая Приазовский выступ. В это время восточная часть Доно-Днепровского авлакогена представляла собой краевой (предгорный) прогиб перед герцинской складчатой областью. Естественно, и Восточный Донбасс, являясь частью этого прогиба, включается в эту же структуру» [110, с. 59].

«Формирование предгорного (краевого) прогиба заканчивается в нижней перми. Он целиком располагался на краю Восточно-Европейской платформы, а в современных границах полностью принадлежит последней, так как выделяемая исследователями система выступов, прослеживающаяся южнее прогиба и включающая Ростовский, Ставропольский, Сальский и другие выступы, относится к Восточно-Европейской платформе. Эта система выступов наследовала протяженный пояс выхода кристаллических пород между байкальской геосинклиналью и рифейским Доно-Днепровским авлакогеном. Современные границы прогиба сформировались в раннем мезозое» [110, с. 59].

«Тектоническая структура Восточного Донбасса характеризуется наличием трех структурных этажей: палеозойского, нижнемезозойского и верхнемезозойско-кайнозойского. Глубина погружения фундамента достигает 22-23 км в южной части Донецкого прогиба, имеющего несимметричный поперечный профиль. ... Тектоника региона характеризуется развитием нескольких систем взаимно-пересекающихся разрывных нарушений. Характер нарушений различный: сбросовый, взбросовый, надвиговый» [42, с.9].

Центральная часть Восточного Донбасса, соответствующая правобережью Северского Донца, сложена полностью литифицированными и метаморфизованными породами карбона (переслаивания песчаников, глинистых и алевролитовых сланцев, алевролитов, прослоев известняков и углей) [20, 110]. Литологическое строение речных долин Быстрой и Калитвы в среднем и верхнем течении характеризуется преобладанием меловых пород (известняки, мергели, алевролиты) (рисунок 1) [20].

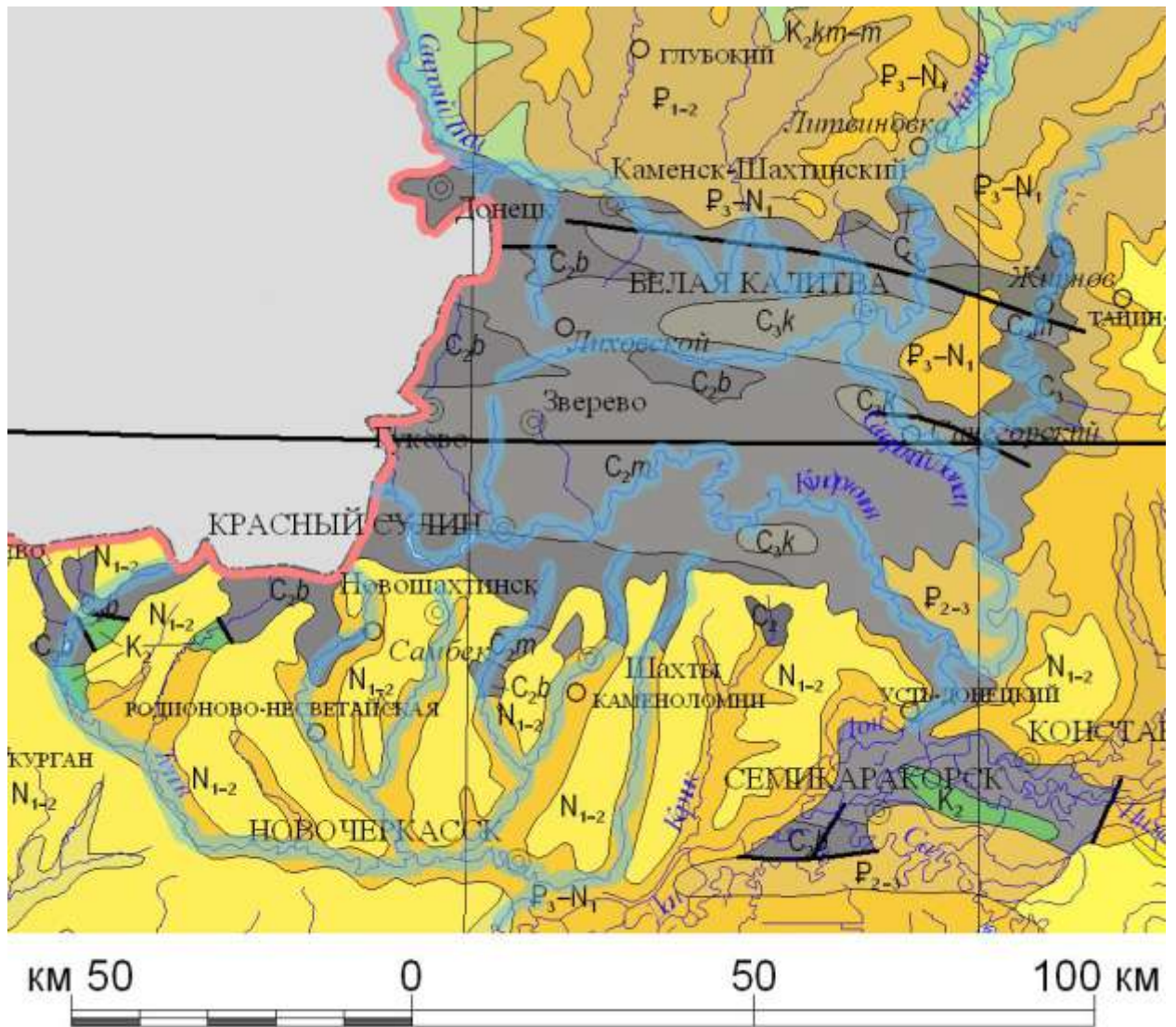


Рисунок 1 – Геологическая карта территории Восточного Донбасса (фрагмент геологической карты Ростовской области) [20]

Обозначения:  $N_{1-2}$  – неоген (миоцен-плиоцен);  $P_3 - N_1$  – олигоцен и миоцен;  $P_{2-3}$  – палеоген (эоцен и олигоцен);  $P_{1-2}$  – палеоген (палеоцен и эоцен);  $K_2$  – мел (верхний отдел);  $K_{2kt-m}$  – мел (кампанский и маастрихтский ярусы);  $C_{3k}$  – карбон (касимовский ярус);  $C_2$  – карбон (средний отдел);  $C_{2m}$  – карбон (московский ярус);  $C_{2b}$  – карбон (башкирский ярус). Голубым цветом выделены исследуемые в работе реки.

В пределах бассейна р. Тузлов и его притоков в среднем и нижнем течении распространены неогеновые отложения (глины, прослои известняков, песчаников, алевролитов, пески, прослои глин). В верхнем течении встречаются отложения каменноугольного периода, представленные песчано-алевролитовыми,

глинистыми сланцами, алевролитами, прослоями песчаников, известняков и углей; и породы верхнемелового отдела ( $K_2$ ), представленные известняками, мергелями, песчаниками, алевролитами и глинами (рисунок 1) [20].

Рельеф территории Восточного Донбасса эрозионный, плоскохолмистый, во многом определяется особенностями геологического строения, литологического состава пород, а также степенью проявления денудационных процессов [110]. Центральным элементом рельефа в пределах исследуемой территории является Донецкий кряж, к северу и югу от которого располагаются Доно-Донецкая и Северо-Приазовская равнины [69].

Донецкий кряж относится к денудационно-эрозионным возвышенностям с высокой степенью расчлененности рельефа. В зонах распространения отложений каменноугольного периода сформировался особый, слабоволнистый микрорельеф, обусловленный частым чередованием пород различного литологического состава с разной устойчивостью к выветриванию. Равнинные пространства водоразделов чередуются с грядами, гривами, цепями холмов, вытянутых по простиранию складок. Основными рельефообразующими процессами для данной территории являются водно-эрозионные, что определяет значительную глубины местных базисов эрозии и густоту эрозионного расчленения: при средних отметках высот 250-300 м глубина овражно-балочной сети изменяется от 100 м на западе до 50 м на востоке Донецкого кряжа [28, 42, 68, 110].

«Доно-Донецкая равнина, примыкающая к Донецкому кряжу с севера и северо-запада, представляет собой ряд плато, вытянутых с севера на юг и разделенных между собой долинами притоков р. Северский Донец» [42, с. 11]. По сравнению с Донецким кряжем, территория характеризуется преобладанием менее контрастных форм рельефа – широкими балками и речными долинами с высокими склонами [110].

Южная и восточная окраины Восточного Донбасса соответствуют Северо-Приазовской эрозионно-аккумулятивной равнине, которая на востоке граничит с долиной Нижнего Дона, на севере – с отрогами Донецкого кряжа, а на юге – с

Таганрогским заливом. Поверхность ее пересечена большим количеством малых рек и балок. Глубина эрозионного расчленения составляет от 50 до 100 м [28, 42].

Характер расчлененности рельефа, густота овражно-балочной сети играют важную роль в поступлении осадочного материала, участвующего в формировании донных отложений. Как уже было сказано выше, рельеф Восточного Донбасса характеризуется высокой степенью расчлененности рельефа местности, что способствует активному склоновому смыву материала почв и материнских горных пород [27].

## **1.2 Климатические условия**

Для территории Восточного Донбасса характерен континентальный климат с резкими колебаниями температуры воздуха по временам года, формирующийся под влиянием приходящих из ближайших регионов воздушных масс, во многом в связи с влиянием геоморфологических факторов. Донецкий кряж выступает барьером для поступающего с северо-восточными ветрами холодного воздуха [80, 115]. Средняя годовая температура воздуха изменяется от  $+7,0^{\circ}\text{C}$  до  $+8,2^{\circ}\text{C}$ , максимальная амплитуда колебания составляет  $80^{\circ}\text{C}$ . Самые теплые месяцы – июнь, июль, самые холодные – январь и февраль [80].

Среднемноголетнее количество осадков изменяется в пределах от 414 до 451 мм/год, при этом около 70 % осадков выпадает в теплый период года в виде ливней. Испарение с водной поверхности более чем в три раза превышает годовую сумму осадков и составляет 1400 – 1600 мм/год. По этой причине территорию Восточного Донбасса можно отнести к зоне недостаточного увлажнения, что негативно отражается на потенциальной водности рек и восполняемости ресурсов подземных вод [80].

«Ветровой режим территории в значительной степени зависит от положения относительно Донецкого кряжа. Так, на северных и южных его склонах наблюдается близкая скорость ветра, которая понижается на водораздельной части и в долине р. Северский Донец. В течение года преобладают ветра

восточных румбов, скорость которых в весенний период может достигать 15 – 20 м/с. Это приводит к интенсивной эрозии (дефляции) почвенного покрова» [42, с. 12-13].

Климатические условия местности не оказывают прямое воздействие на процессы формирования и преобразования донных отложений рек, влияние проявляется лишь косвенно [27]. В частности, количество атмосферных осадков в совокупности с рельефом обуславливают характер развития водной эрозии, следовательно, и на смыв почвенного материала в поверхностные воды. Ветровой режим территории оказывает влияние на размыв берегов и эоловый перенос вещества, ветровую эрозию и волнение.

### **1.3 Почвенный покров**

Территория Восточного Донбасса расположена в зоне распространения черноземов южных и обыкновенных. Кроме того, в долинах рек встречаются азональные типы почв (аллювиальные луговые насыщенные и песчаные почвы) [118].

Район исследований расположен в пределах Предкавказской и Южнорусской почвенной провинции.

«Приазово-Предкавказская провинция мощных и сверхмощных черноземов занимает обширные равнины Западного, и Центрального Предкавказья. ... Почвы провинции характеризуются высокой мощностью гумусовых горизонтов (1,0-2,0 м) и низким содержанием гумуса (4-6%). ... Основу почвенного покрова провинции составляют черноземы южноевропейской фации: южные (каштановые), обыкновенные (карбонатные), типичные, выщелоченные» [9, с. 52].

«Донская подпровинция Среднерусской степной провинции обыкновенных и южных черноземов занимает северную и центральную часть Ростовской области. ... Обыкновенные и южные черноземы Донской подпровинции относятся к почвам восточно-европейской фации. ... Наиболее характерными чертами южных черноземов являются следующие: мощность гумусовых

горизонтов (А + АВ) находится в пределах 50-70 см, содержание гумуса – 4-6 %. В обыкновенных черноземах мощность гумусовых горизонтов достигает 75 см, а гумуса – 6-7 %. В данной провинции сильно развиты процессы овражной и плоскостной эрозии. Распаханность земель достигает 60-70 %» [9, с. 52-53].

Черноземы южные являются самыми распространенными среди зональных почв в пределах области и «занимают всю Доно-Донецкую равнину и более половины Донецкого кряжа... Профиль этих почв характеризуется темно-серой с буроватым оттенком окраской, книзу переходящей в неоднородную бурую с темными гумусовыми затеками толщу. Верхняя часть профиля имеет неплотное сложение, комковато-зернистую (на целине) или комковато-порошистую (на пашне) структуру» [5, с. 43].

«Содержание физической глины в горизонте А в глинистых разновидностях, имеющих преимущественное распространение, составляет 67–72 % (в том числе илистой фракции 38–40 %), в тяжелосуглинистых разновидностях – 52–53 % (в том числе ила – 33–34 %). Доля крупной пыли (лессовидной фракции) в глинистых разновидностях составляет 24–25 %, в тяжелосуглинистых – 23–24 %. По профилю гранулометрический состав изменяется незначительно» [5, с. 44].

Черноземы обыкновенные, по данным [5, 9], характеризуются меньшей площадью распространения. «Сплошными массивами они залегают лишь на высоких водоразделах плато по отрогам Донецкой возвышенности и ее склонам на территории Красносулинского, Октябрьского, Родионово-Несветайского ... и отчасти Каменского и Матвеево-Курганского районов. Кроме того, они встречаются небольшими островками среди южных черноземов северо-западной части области по высоким плоским, плато междуречных водоразделов» [5, с. 61; 10, с.104].

«Профиль этих почв характеризуется интенсивно-темно-серой, почти черной, окраской, очень постепенно буреющей книзу, хорошо выраженной зернистой или комковато-зернистой структурой в верхней части и комковато-ореховатой или ореховато-комковатой структурой – в нижней части профиля. В

пахотном слое структура порошистая или комковато-порошистая. Сложение в верхней части профиля рыхлое или рыхловатое» [5, с.61].

«Количество физической глины в горизонте А равно 65–70 %, в том числе ила – около 40 %; крупной пыли в разновидностях, сформированных на желто-бурых глинах, – 23–27 %, на лессовидных глинах – до 31 %» [5, с. 63].

«Черноземы южные и обыкновенные сходны по валовому составу. Содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{R}_2\text{O}_3$  в основном мало изменяется по профилю. Это подтверждается и характером молекулярных отношений, которые в гумусовом горизонте близки. ... Выявить степень дифференциации элементов валового состава по профилю в процессе черноземообразования затруднительно, создается представление об устойчивости вещественного состава минеральной части» [9, с. 86].

Как показано в монографии В.Ф. Валькова с соавторами, «в составе илистых фракций почв Северного Кавказа наблюдаются три группы глинистых минералов: иллит (гидрослюд), монтмориллонит и каолинит» [9, с. 84-85]. Содержание иллита варьирует от 36 до 49 % и возрастает от черноземов южных к обыкновенным. Доля монтмориллонита изменяется от 22 до 46 %. Количество каолинита в илистой фракции колеблется от 10 до 21 %.

Кроме того, автор работы [9] указывает, что в составе тяжелых минералов песчаной фракции черноземов южных значительная доля приходится на оксиды и гидроокислы железа (магнетит, гематит, лимонит – 65-92 %), а также ильменит (30-69% от массы фракции). При этом отмечено, что содержание этих двух групп тяжелых минералов находится в обратной зависимости: увеличение содержания гидроокислов и оксидов железа приводит к снижению содержания ильменита и наоборот.

«Группа типов аллювиальных пойменных и дельтовых почв характеризуется регулярным затоплением паводковыми водами и отложением слоев аллювия. Под аллювием понимаются осадки, образующиеся в речных долинах, принесенными паводковыми водами. Регулярность отложения речных наносов – типичная черта почвообразования в поймах и дельтах» [9, с. 205].

Аллювиальные луговые почвы «характеризуются четкой слоистостью профиля и отсутствием генетических горизонтов. Механический состав по профилю неоднороден: светлые песчаные и супесчаные слои чередуются с темными суглинистыми прослойками. Профиль заметно прогумусирован (особенно в слоях суглинистого аллювия), главным образом, за счет остаточного (аллювиального) гумуса, содержащегося самом почвообразующем аллювии» [9, с. 208].

Для всех зональных и азональных типов почв Ростовской области отмечаются локально-гидроморфные почвы, в пределах которых процессы переувлажнения сменяются окислительным режимом [44]. Соединения железа (окислы и гидроокислы) придают профилю гидроморфных почв «ярко-оранжевые и ржавые тона, которые распределяются в виде пятен и примазок. Они сочетаются с пятнами яркого сизо-зеленого цвета истинного оглеения. Образуется мраморовидная пятнистая окраска, как результат периодичности (сезонности) в избыточном увлажнении, т.е. периодичности в господстве восстановительных и окислительных условий» [9, с. 209].

#### **1.4 Поверхностные и подземные воды**

Территорию Восточного Донбасса достаточно четко можно разделить на две основные водосборные площади. В пределах Доно-Донецкой равнины находятся бассейн реки Северский Донец. Долины рек в значительной степени разработаны, отчетливо выражены поймы и надпойменные террасы. Реки бассейна Тузлова протекают в пределах Северо-Приазовской равнины, имеют субмеридиональное простирание и характеризуются мелководностью, а начало берут на Донецком кряже. При этом последний выступает в роли водораздела двух изучаемых бассейнов [42, 69].

Питание рек бассейнов Северского Донца и Тузлова преимущественно снеговое и относятся они к восточно-европейскому типу. Для этих рек наблюдается неравномерное распределение стока в течение года. Характерным

является большое весеннее половодье с одним пиком и преимущественно устойчивая летнее-осенняя и зимняя межень. Во время весеннего половодья проходит от 60 до 80 % годового стока в различные по водности годы. Питание степных рек подземными и грунтовыми водами не обеспечивает постоянного стока, во время межени многие реки мелеют и даже пересыхают [28, 58, 88-90].

Северский Донец – большая река общей протяженностью 1053 км, лишь в нижнем течении протекает по территории Ростовской области (280 км). Площадь бассейна составляет около 98,9 тыс. км<sup>2</sup> [58].

Гидрографическая сеть бассейна является весьма неравномерной, средняя густота речной сети составляет 0,28 км/км<sup>2</sup>. Наиболее густая речная сеть (0,3-0,7 км/км<sup>2</sup>) характерна водосборов притоков Северского Донца – Большая Каменка, Калитва и Кундрючья. Общая же численность притоков реки Северский Донец составляет более 3000 [58, 89].

К основным притокам Северского Донца на территории Ростовской области относятся реки Кундрючья, Лихая, Калитва, Быстрая, Большая и Малая Каменка и др., характеризующиеся большой извилистостью русла, непостоянной глубиной и шириной, асимметричными берегами [69]. За исключением рек Калитва и Быстрая, притоки Северского Донца отличаются малой водностью [42]. Основные характеристики отдельных рек бассейна Северского Донца приведены в таблице 1.

Река Тузлов – средняя река протяженностью 182 км (в пределах Ростовской области – 176,5 км). Площадь ее водосбора равна 4680 км<sup>2</sup>, что составляет чуть более 1% всей площади водосбора р. Дон (422 000 км<sup>2</sup>) [42]. «Бассейн реки Тузлов является частью водосборного бассейна р. Дон, он граничит большими и малыми водосборами других реки балок» [51, с. 9].

Река Тузлов имеет около 40 притоков, при этом гидрографическая сеть бассейна имеет ассиметричное строение: все основные притоки (рр. Большой Несветай, Грушевка, Кадамовка и др.) являются левобережными [51, 58]. Густота речной сети в пределах бассейна составляет 0,2-0,3 км/км<sup>2</sup>. Основные притоки

Тузлова относятся к категории малых рек. Лишь река Тузлов можно классифицировать как водоток со средним уровнем водности (таблица 1) [42, 51].

Таблица 1 – Основные характеристики рек Восточного Донбасса (составлено по [42])

Река	Общая площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Длина, км	Расход воды, м <sup>3</sup> /с		Категория реки
			в устье	в пункте	
Бассейн Северского Донца					
Северский Донец	98,9	1053	147,02	г. Белая Калитва - 145	Большая
Калитва	10,6	308	12,26	х. Погорелов - 15,2	Средняя
Кундрючья	2,32	244	5,46	п. Мостовой - 4,40	Средняя
Быстрая	4,18	218	1,37	х. Худяковский - 4,44	Средняя
Большая Каменка	1,81	118	2,49	пос. Первомайка - 2,70	Малая
Лихая	0,738	69	0,38	х. Богураев - 1,23	Малая
Большая Гнилуша	0,264	30	0,55	-	Малая
Малая Каменка	0,202	27	0,09	х. Волченский - 0,19	Малая
Бассейн Тузлова					
Тузлов	4,68	182	6,13	с. Несветай - 2,2	Средняя
Грушевка	0,941	82	1,47	г. Шахты - 0,39	Малая
Кадамовка	0,468	80,9	0,42	-	Малая
Большой Несветай	0,966	71	0,32	с. Гребцово - 1,10	Малая
Малый Несветай	0,356	48	0,19	-	Малая
Аюта	0,318	47	0,40	-	Малая
Атюхта	0,07	14	0,13	-	Малая

Гидрологический режим реки в совокупности с другими факторами (рельеф, геологические и климатические условия) непосредственно определяет процессы формирования и трансформации вещественного состава донных осадков. В частности, гидрологический режим реки в совокупности с морфометрией русла влияет на скорость распространения поступающих в водоток веществ и их транспорт в водном потоке [81].

В условиях значительного антропогенного воздействия на поверхностные воды (зарегулированность рек, забор воды для нужд хозяйства и др.) происходят изменения морфометрических характеристик русел малых рек, что усугубляется недостаточным количеством осадков и высокой испаряемостью. Снижение проточности на участке реки на порядок и больше уменьшают скорости стоковых течений. В комплексе с волновыми колебаниями, дрейфовыми и компенсационными течениями, они принимают активное участие в отсортировке формирующего материала, как проходящего через водную толщу, так и уже отложившегося на дне [27].

Как следует из данных, представленных в таблице 1, реки бассейна Тузлова характеризуются более низким расходом воды в реках (по сравнению с реками бассейна Северского Донца), поэтому в большей степени будут подвержены заилению и, соответственно, большему накоплению загрязняющих веществ.

Во многом состав речных вод будет определяться и химическим составом подземных вод, которые «на территории Восточного Донбасса связаны с водоносными горизонтами каменноугольного, палеоген-неогенового и четвертичного возраста. Каменноугольный водоносный горизонт представлен водовмещающими породами среднего и верхнего карбона ( $C_{2-3}$ ), распространенными в регионе повсеместно» [42, с. 19]. Состав вод сульфатно-гидрокарбонатный (реже хлоридный), среди катионов преобладают кальций и магний. Минерализация достигает 5 г/л, в среднем составляя 3 г/л [103].

«Палеогеновые водные коллекторы ( $P_{1-3}$ ) представлены песками, песчаниками и алевролитами». Минерализация вод колеблется от 0,3 до 2,4 г/дм<sup>3</sup>, «состав их изменяется от гидрокарбонатного магниевое-кальциевого до хлоридного натриевого с высоким содержанием йода и брома» [42, с. 20].

«Водные коллекторы четвертичной системы ( $Q_{1-4}$ ) представлены суглинками, супесями и песками аллювиального, делювиального и эолового генезиса. Эти отложения наиболее распространены, имеют максимальную мощность (до 20 м) и наибольшее хозяйственное значение в южной части региона. Здесь они развиты в долинах рек Кундрючья, Тузлов, Грушевка и др., в

открытом Донбассе – связаны с аллювием рек Дон и Северский Донец, в меньшей степени они встречаются на водоразделах. ... Состав вод сульфатно-гидрокарбонатный, сульфатный, сульфатно-хлоридный, из катионов преобладают кальций и магний. ... Минерализация достигает  $15 \text{ г/дм}^3$ , составляя в среднем от  $1-3 \text{ г/дм}^3$ » [42, с. 20-21].

Тем самым, как и подземные, так и поверхностные воды характеризуются гидрокарбонатным и сульфатно-гидрокарбонатным составом, однако среди катионов в поверхностных водах преобладает натрий-калий, в подземных – кальций и магний.

### **1.5 Воздействие угледобывающей промышленности на природные среды Восточного Донбасса**

«Восточный Донбасс относится к развитым в промышленном отношении районам Российской Федерации. Развитие промышленности здесь происходило благодаря становлению угледобычи» [110, с. 55]. На базе дешевых углей еще в XIX веке был основан Красносулинский металлургический завод, деятельность которого в настоящий момент приостановлена. Кроме того, существует машиностроительная, текстильная индустрия, осуществляют свою работу четыре теплоэлектростанции.

Гидроэкологическая ситуация в бассейнах рек Северского Донца и Тузлова обострилась с началом реструктуризации угольной промышленности в 1990-х годах [43]. Ростовская область относится к числу регионов, в которых в процессе реструктуризации угольной промышленности осуществлено широкомасштабное закрытие горнодобывающих предприятий [50].

Бассейны рек Северского Донца и Тузлова расположены в пределах Белокалитвенского, Гуково-Зверевского, Каменско-Гундоровского, Краснодонецкого, Миллеровского, Сулино-Садкинского, Тацинского и Шахтино-Несветаевского угленосных районов. Большая часть действующих шахт расположена в пределах Гуково-Зверевского угленосного района, между реками

Кундрючья и Лихая [110, 111].

В результате реструктуризации угольной промышленности из 64 действовавших в Ростовской области шахт лишь 6 продолжают деятельность, ещё 6 находятся в режиме поддержания жизнедеятельности, реконструкции и внешнего наблюдения. «Полностью утратил угольную специализацию Донецк, все угольные предприятия были закрыты в Новошахтинске и Шахтах» [35, с. 123]. Как следствие, добыча угля в области сократилась с 30 млн.т/год в 1995 году до 5,9 млн. т/год в 2022 году, то есть практически в 5 раз [49, 109].

При этом основное воздействие на речные экосистемы Восточного Донбасса будет оказывать именно угледобывающая промышленность. Так, по данным государственного доклада о состоянии окружающей среды Ростовской области [119] следует, что общий объем сбросов сточных вод в реки Восточного Донбасса за 2014 год составил 71,5 млн. м<sup>3</sup>, из которых 15,5 млн. м<sup>3</sup> пришлось на действующие угледобывающие предприятия. При этом объем техногенных шахтных вод, поступающих с ликвидированных шахт, составил около 36 млн. м<sup>3</sup>. К тому же, не стоит забывать о том, что до этого периода объемы сбрасываемых техногенных шахтных вод были существенно выше, в результате чего речные воды и донные отложения изучаемого района испытывают долговременное непрерывное воздействие угледобывающей промышленности. Так, по данным [34], количество сточных вод, поступивших в реку Кундрючья и ее притоки за 1995 год с шахтными водами составило 30 млн. м<sup>3</sup>, что в два раза превышает уровень сброса от действующих предприятий угледобычи и сопоставимо с объемом техногенных шахтных вод, поступающих с ликвидированных шахт (в целом по Восточному Донбассу).

Влияние широко распространенного на территории Восточного Донбасса сельского хозяйства на состояние поверхностных водных объектов будет не настолько существенным. Как показано в исследовании [116], по многим ключевым показателям развития животноводства уровень воздействия не превышает экологические нормативы, а главным фактором воздействия растениеводства будет выступать распаханность территории, которая влияет на

степень проявления водной и ветровой эрозии. По количеству вносимых удобрений административные районы Восточного Донбасса также характеризуются значениями, уступающими средним по области, поэтому сельское хозяйство не может считаться основным источником поступления тяжелых металлов в поверхностные воды Восточного Донбасса.

Теперь обратим внимание на основные проблемы, связанные с воздействием предприятий угледобывающей промышленности. Одним из источников техногенного воздействия в пределах углепромышленных территорий являются отвалы угольных шахт и терриконы. «К началу реструктуризации угольной отрасли на территории Донбасса находилось более 400 терриконов общим объёмом порядка 400 000 тыс. м<sup>3</sup>, которые занимали более 3 тыс. га наиболее плодородных земель – чернозёмов» [35, с. 122]. «Породные отвалы угледобывающих районов неустойчивы в условиях земной поверхности. Они подвергаются, прежде всего, физическому и химическому выветриванию..., что способствует изменению их химического состава... Гипергенная переработка и горение отвалов продолжаются на протяжении многих лет» [30, с. 68].

В результате описанных выше процессов формируются трансформированные литогеохимические ореолы и происходит образование вторичных техногенных потоков загрязнителей – атмо-, лито- и гидрохимических техногенных потоков [108].

«Поступление загрязняющих веществ в атмосферу происходит в результате ветровой эрозии и самовозгорания терриконов» [30, с. 68]. Следствием этого стало формирование в Восточном Донбассе комплексной атмогеохимической аномалии, отвечающей критическому и кризисному уровням загрязнённости атмосферного воздуха [118]. По данным государственного доклада о состоянии окружающей среды Ростовской области [120] можно оценить современное состояние атмосферного воздуха в городах Восточного Донбасса. Уровень загрязнения воздуха городов Шахты и Новошахтинск за 2021 год является высоким (по показателю ИЗА<sub>5</sub> 8 и 7 соответственно), в то время как в городе Гуково отмечается повышенный (ИЗА<sub>5</sub> = 6) уровень загрязнения.

Другим важным показателем загрязненности атмосферного воздуха является химический состав атмосферной пыли. В исследовании 2015 года [36] проведен анализ атмосферных выпадений на территории Восточного Донбасса. Показано, что во всех исследуемых пробах пылевая нагрузка на порядок выше фонового значения. Максимальная пылевая нагрузка наблюдается в пос. Соколово-Кундрючем (Красносулинский район), где отмечены наибольшие содержания Mn, Ni, Zn и Cu в атмосферной пыли среди всех исследованных проб. Кроме того, повышенными содержаниями тяжелых металлов характеризуются атмосферные выпадения в х. Гуково (Mn, Ni, Zn), пос. Аютинском (Cr, V, Pb), пос. Горняцкий (Mn, Cr, Cu) и гор. Каменск-Шахтинский (Mn, Cr, Zn). При этом очевидно, что загрязняющие вещества, поступающие из воздушной среды, имеют свойство накапливаться в депонирующих средах – почвах и донных отложениях рек и водохранилищ Восточного Донбасса.

В контексте темы данной работы большой интерес представляет формирование вторичных гидрохимических потоков в результате окисления и сернокислого гидролиза материала породных отвалов. «Состав водорастворимых солей, мигрирующих с этими потоками, – преимущественно сульфатный. ... Из катионов преобладают Na и Mg, соотношение которых также подвержено существенным колебаниям. Особого внимания заслуживают соединения Fe, содержание которых во вторичных гидрохимических потоках может достигать 5400 мг/дм<sup>3</sup>» [30, с. 68].

Интенсивная миграция металлов и их соединений приводит к загрязнению верхнего слоя почв в районах расположения породных отвалов, терриконов и предприятий угледобывающей промышленности [48]. При контакте сернокислых потоков с повсеместно распространенными на Восточном Донбассе черноземами обыкновенными происходит формирование щелочных геохимических барьеров. «В дальнейшем большая часть химических элементов поглощается почвой и сосредотачивается в гумусовом горизонте, формируя локальные зоны загрязнения, и только некоторая часть (Ag, Bi, Mo, Nb, W) рассеивается вниз по почвенному профилю» [30, с. 69].

Работы, посвященные изучению почвенного покрова Ростовской области и, в частности, Восточного Донбасса, свидетельствуют об существенном загрязнении почвенного покрова в углепромышленных районах. Так, по данным исследования [75], почвы городов Шахты и Гуково относятся либо к умеренно опасной, либо к допустимой категории загрязнения по показателю  $Z_C$ . По превышениям относительно фона составлены ранжированные ряды приоритетных тяжелых металлов. Для почв города Шахты в среднем ассоциация элементов выглядит так:  $Co_{5,6} Ni_{1,9} Zn_{1,9} As_{1,7} Cu_{1,4} Pb_{1,1}$ . Для почв города Гуково аналогичная ассоциация имеет следующий вид:  $Co_{5,4} Zn_{5,1} Pb_{2,7} As_{2,5} Ni_{2,0} Cu_{1,6}$ . Обращает на себя внимание, что наибольшее загрязнение почв города Гуково приурочено к угольным шахтам Ростовская и Гуковская и угольным отвалам на территории города.

В исследовании почвенного покрова вблизи шахты им. Ленина г. Новошахтинск [54], показано, что в непосредственной близости от угольного отвала концентрация  $Cu$  и  $Pb$  может в 7 и 8 раз превышать фоновую. Показано, что с ростом общей концентрации  $Pb$  отмечено увеличение доли его подвижных форм, с органическим веществом и оксидами  $Fe$  и  $Mn$ .

С породных отвалов поверхностными стоками выносятся не только водорастворимые соединения, но также коллоидные частицы и большое число механических взвесей [30]. «Вещества, поступающие в результате водной миграции, образуют специфические наносы на поверхности почв – «техногенный делювий», мощность которого меняется от нескольких сантиметров до полуметра. По микроэлементному составу образования данного типа на территории Донбасса занимают промежуточное положение между отвалами пород и почвами, находящимся за пределами выноса «техногенного делювия»» [30, с. 69].

Загрязнение поверхностных и подземных вод происходит при просачивании атмосферных осадков через породные отвалы, при попадании сточных техногенных вод из-под породных отвалов в речную сеть [30]. Как указывают авторы исследования [35], в результате затопления нерентабельных шахт повсеместно произошел выход высокоминерализованных техногенных вод на

дневную поверхность, что оказывало существенное влияние на качество поверхностных вод. При этом наиболее уязвимыми оказались малые и средние реки в силу невысокой самоочищающей способности. Многие из них практически полностью утратили свои природные функции, стали непригодными для использования не только в питьевых, но и в хозяйственных целях [33, 70]. «Сопоставимая по глубине трансформация затронула и подземные воды региона» [35, с. 122].

В свою очередь, степень воздействия шахтных вод и их химический состав изменяется в зависимости от происходящих в недрах процессов. Так, в работе исследователей [14] анализируется состав шахтных вод Восточного Донбасса за столетний период (с 1920 по 2015 гг.). Авторы отмечают волнообразный характер изменения минерализации и содержаний большинства ионов: максимальные значения приходятся на периоды, связанные с затоплением угольных шахт во время Великой Отечественной войны (1943-1955 гг.) и при массовой ликвидации шахт после 2000 года. В настоящее время происходит максимальное загрязнение поверхностных и подземных вод [14].

Наиболее существенные изменения в химическом составе шахтных вод произошли в последние 30 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности, предусматривающей ликвидацию нерентабельных шахт путем их затопления. Как показано в исследовании В.Е. Закруткина и Е.В. Гибкова, «минерализация шахтных вод за этот период возросла в среднем на 55 %, а количество отдельных макрокомпонентов (сульфатов, Mg и Ca) увеличилось на 100–150 %. Аналогичные изменения произошли и в микрокомпонентном составе шахтных вод... Вместе с тем состав микрокомпонентного состава техногенных шахтных вод во многом соответствует набору типоморфных элементов в поверхностных и подземных водах Восточного Донбасса. Это свидетельствует о существенной роли техногенных шахтных вод в формировании качества поверхностной и подземной гидросферы» [30, с. 70].

Ликвидация нерентабельных шахт путем затопления привела к формированию высокоминерализованных шахтных и подземных вод, в результате

чего последние стали непригодны для хозяйственно-питьевого использования. Поступление техногенных шахтных вод на дневную поверхность и в речную сеть привело к резкому ухудшению качества поверхностных вод. В наибольшей степени такому воздействию оказались подвержены реки Кадамовка, Малый и Большой Несветай, Аюта, Кундрючья, Гнилуша, Лихая, Бургуста, Малая Каменка [30]. Так, в работе [14] приведены данные по выносу растворенных веществ и некоторых компонентов шахтными водами в гидрографическую сеть Восточного Донбасса.

«На воды р. Кадамовка основное влияние оказывает сброс шахты Глубокая, воды которой имеют минерализацию 12700, содержание сульфат-иона – 8200 и железа – 110 мг/л» [14, с. 285].

Основное воздействие на состояние речных вод р. Лихая оказывают сбрасываемые шахтные воды ш. Комиссаровская. По данным исследования [14], после ликвидации шахты наблюдается повышение минерализации в 5 раз, сульфат-ионов – в 5 раз, железа – 10-12 раз, что привело к резкому росту загрязнения р. Лихая.

В работах [40, 42, 91, 98, 155] отражены особенности химического состава и качества речных вод Восточного Донбасса за 2014-2015 гг. Отмечено, что в этот период химический состав речных вод характеризуется следующими общими особенностями: нейтральной или слабощелочной реакцией среды (6,5–8,5); насыщенностью кислородом (от 6,8 до 14,9 мг/дм<sup>3</sup>); высоким содержанием сульфатов и минерализацией речных вод (от 1,0 до 6,8 г/дм<sup>3</sup>).

Поверхностные воды Восточного Донбасса характеризуются следующими особенностями содержания микроэлементов. Концентрации Cd, как правило, не превышают предельно допустимые. Li и Be характеризуются превышением ПДК в большинстве проб, но при этом не относятся к критическим показателям загрязненности. К числу приоритетных загрязняющих веществ относят Fe, Al, Mn, Cu, Sr: их концентрации заметно превышают установленные нормативы (соответственно до 19,0; 48,5; 135,0; 10,0 и 18,0 ПДК) на большинстве проб и створов. Благодаря этим особенностям Fe, Al, Mn, Cu и Sr представляют

наибольшую опасность для поверхностных вод бассейнов Северского Донца и Тузлова [40, 77, 100].

«В настоящее время наихудшим качеством отличается вода рек бассейна Тузлова: по результатам комплексной оценки (РД 52.24.643) оно оценивается 5-м классом – «экстремально грязная». Из 19 определяемых нормируемых ингредиентов в воде большинства створов от 9 до 12 из них являются характерными загрязняющими веществами, от 6 до 9 – критическими показателями загрязнения воды. В число критических, наряду с микрокомпонентами (Fe, Al, Mn, Cu, Sr), входят макрокомпоненты: сульфаты, ионы натрия и магния» [77, с. 187].

«Несколько ниже загрязненность рек бассейна Северского Донца. Качество воды здесь по результатам комплексной оценки варьирует от 4-го класса («грязная» и «очень грязная») до 5-го класса («экстремально грязная»). Наибольшим уровнем загрязнения в этом бассейне характеризуются реки Большая Каменка, Кундрючья и Большая Гнилуша, а наименьшим (4-й класс) – реки Малая Каменка, Быстрая (верховья рек) и Северский Донец» [40, с. 105].

Тем самым, угледобывающая промышленность Восточного Донбасса оказывает воздействие на все компоненты окружающей среды. Породные отвалы вызывают загрязнение атмосферы при горении и пылении, гидросферы и почвенного покрова в результате образования сернокислых геохимических потоков и просачивании атмосферных осадков через материал породных отвалов. Изливы высокоминерализованных шахтных вод приводят к ухудшению качества подземных и поверхностных вод: их подкислению, засолению и загрязнению тяжелыми металлами [42]. В результате всех этих процессов происходят изменения в химическом и минеральном составе донных отложений, которые, как указывалось ранее, являются конечным звеном ландшафтно-геохимических сопряжений и отражают геохимические особенности водосборной площади.

## 1.6 Восточный Донбасс как природно-техногенная геохимическая региональная аномалия

Природно-техногенные геохимические региональные аномалии формируются при сочетании всех природных особенностей территории и влиянии антропогенных факторов. Среди последних могут выделяться такие, «геохимический вклад которых резко превалирует над другими, как, например, горное производство. Так именно угольная промышленность определила современные геохимические особенности Восточного Донбасса – одного из старейших горнопромышленных регионов» [104, с. 162]. «Породы карбона содержат запасы высококачественного каменного угля, промышленная разработка которого осуществлялась на протяжении последних двух столетий, что привело к формированию здесь региональной природно-техногенной геохимической аномалии, представляющей собой зону размещения месторождений угля и предприятий угледобывающей промышленности» [31, с. 21].

На протяжении многих лет экосистемы Восточного Донбасса подвергаются интенсивному техногенному воздействию, по этой причине его зачастую рассматривают как один из наиболее проблемных в экологическом отношении районов Российской Федерации. Начавшаяся около 30 лет назад реструктуризация угледобывающей отрасли, предусматривающая ликвидацию нерентабельных шахт, вызвала активизацию негативных природно-техногенных процессов [42, 71, 84]. Однако, формированию на территории Восточного Донбасса комплексной геохимической аномалии способствовали и особые природные условия, среди которых определяющую роль играет геологическое строение и рельеф.

Сформировавшись как часть протяженного прогиба, Восточный Донбасс представлял собой зону осадконакопления, где аккумуляровались отложения карбона значительной мощности. По особенностям геологического строения Доно-Донецкий прогиб также отличался от окружающих его платформенных областей, что выразилось и в литологическом составе пород изучаемой

территории. Особенности рельефа Восточного Донбасса способствуют активному развитию водной и ветровой эрозии. Донецкий кряж характеризуется высокой степенью расчлененности рельефа, представленного частым чередованием равнинных пространств водоразделов с грядами, гривами и цепями холмов. В то же время примыкающие к нему Доно-Донецкая и Северо-Приазовские равнины характеризуются преобладанием овражно-балочного рельефа – менее контрастного, но также способствующего активному смыву и переносу материала почв и горных пород.

Различия в особенностях тектонического и геологического строения, литологического состава пород не могло не сказаться на характере почвообразования на Восточном Донбассе. Как справедливо отмечает В.А. Алексеенко, «большое влияние на распределение химических элементов (в том числе тяжелых металлов) в ландшафте оказывает состав пород, на которых формируются почвы, поскольку коренные породы – непосредственные и постоянные поставщики металлов в систему ландшафта... Исследуемая территория по большей части перекрыта современными отложениями, и выходы коренных горных пород на поверхность сравнительно редки... Каменноугольные породы представлены многократно переслаивающимися песчанистыми и глинистыми сланцами, песчаниками и углями, ... наблюдаются по рекам Кундрючья, Лихая, Северский Донец, Быстрая и др. ... В бассейне р. Тузлов в естественных обнажениях встречаются однородные известковистые толщи, менее метаморфизованные и дислоцированные. Севернее и южнее Донбасса по долинам рек обнажаются меловые отложения, представленные часто переслаивающимися известняками, мергелями, песчаниками и алевролитами» [2, с. 52].

Для почв ландшафтов, сформированных на каменноугольных терригенных породах, по данным Алексеенко [2], отмечаются повышенные относительно кларка содержания Pb, Co и Zn на большей части исследуемых ландшафтов. Отмечаются также повышенные содержания V, Ni и Cu. Почвы на меловых карбонатно-терригенных отложениях характеризуются меньшим набором

элементов с аномальными содержаниями: Pb, V и Cu встречаются в концентрациях выше кларковых на половине исследуемых участков (таблица 2).

Почвы ландшафтов, сформированных на породах неогена, характеризуются повышенными содержаниями Ni на большей части исследуемых участков, Pb, Cu и Zn – на трети исследуемых участков. При этом в почвах Ростовской области в целом содержания марганца и хрома, как правило, ниже кларка – этим элементам не свойственно накопление в почве (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристика элементного состава ландшафтов с различным составом и возрастом подстилающих пород (составлено по [2])

Элемент	% ландшафтов (по типу почвоподстилающих пород) с содержаниями элемента выше кларка	
	Неогеновые терригенные и карбонатно-терригенные	Каменноугольные терригенные
Pb	33,3	75,0
Ti	-	-
V	-	33,3
Cr	-	-
Mn	-	-
Co	-	66,7
Ni	66,7	33,3
Cu	33,3	33,3
Zn	33,3	66,7

Тем самым, можно сделать вывод о том, что различие в составе подстилающих пород влияет на химический состав почв и их геохимическую специализацию. Для почв в пределах Донецкого кряжа, формирующихся на каменноугольных терригенных породах, характерны повышенные содержания Pb, Co, Zn, V, Ni и Cu; почвы, формирующиеся на неогеновых терригенных породах в бассейне Тузлова, характеризуются аномальными содержаниями Ni, а также Pb, Cu и Zn. Можно сделать вывод, что еще до начала промышленного освоения месторождений Восточного Донбасса происходили геохимические процессы, способствующие формированию полиэлементных аномалий, обусловленных составом почвоматеринских горных пород.

Поверхностные воды Восточного Донбасса представлены двумя речными бассейнами: Северского Донца и Тузлова. Для бассейна Северского Донца в целом характерна большая водность рек, помимо Северского Донца, относящегося к категории больших рек, наблюдается также ряд средних и малых рек. В пределах бассейна Тузлова только сам Тузлов можно классифицировать как среднюю реку, его притоки – это малые реки.

С учетом того, что бассейны рек Северского Донца и Тузлова расположены на различных по своему геологическому строению и особенностям рельефа территориях, то и фоновые содержания элементов в речных водах должны отличаться. Так, по данным исследования [41], речные воды бассейнов Северского Донца и Тузлова в фоновых створах отличаются как по содержанию макрокомпонентов, так и по микроэлементам (таблица 3).

Как видно из указанных в таблице 3 данных, речные воды бассейна Тузлова в фоновых створах превосходят аналогичные воды бассейна Северского Донца по содержанию  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , минерализации, алюминия, бериллия, кадмия, лития и стронция. Фоновые участки рек бассейна Северского Донца характеризуются большими содержаниями марганца и ионов  $\text{Cl}^-$ . По классификации О.А. Алекина [1, 76] поверхностные воды в фоновом створе бассейна Тузлова являются сульфатно-натриевыми, а в фоновом створе бассейна Северского Донца – сульфатно-кальциевыми.

Микрокомпонентный состав речных вод объяснить только лишь природными особенностями не представляется возможным. Как было выявлено ранее, каменноугольные породы являются источником бóльшего числа элементов в почвах исследуемого района, чем неогеновые. Такая же закономерность должна наблюдаться и для поверхностных вод, которые дренируют указанные породы, однако мы наблюдаем обратную картину. Фоновое содержание микроэлементов в водах бассейна Тузлова, реки которого протекают через породы неогенового периода, характеризуются бóльшими содержаниями практически всех элементов, за исключением марганца. Таким образом, можно предполагать, что химический состав природных вод здесь во многом формируется под воздействием

техногенных источников. Этим можно объяснить и высокое содержание сульфат-ионов в бассейне Тузлова. Кроме того, содержание бериллия, который является одним из главных элементов-примесей углей, в бассейне Тузлова более чем в два раза выше, чем в бассейне Северского Донца.

Таблица 3 – Фоновые концентрации химических веществ в речных водах бассейнов Северского Донца и Тузлова (составлено по материалам [41, 42])

Компоненты	Фоновые концентрации, мг/дм <sup>3</sup>	
	Бассейн Тузлова	Бассейн Северского Донца
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	242	129
Ca <sup>2+</sup>	149	151
Mg <sup>2+</sup>	71	30
Cl <sup>-</sup>	30	203
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	982	361
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	378	272
Минерализация	1983	1112
Железо	0,26	0,25
Al	0,22	0,14
Be	0,0007	0,0003
Cd	0,0004	0,0003
Li	0,020	0,015
Mn	0,04	0,13
Cu	0,002	0,002
Sr	2,31	1,35

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в пределах Восточного Донбасса выделение фоновых створов рек, которые будут в наименее подвержены техногенному воздействию, практически невозможно. Природно-климатические условия определяют низкую водность рек, их заиленность и извилистость. Однако, микроэлементный состав природных вод формируется в значительной степени под влиянием угледобывающей промышленности.

Длительное по времени и обширное по площади влияние добычи угля на компоненты природной среды резко усилилось в последние 30 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности, в результате которой большинство шахт Восточного Донбасса были закрыты. Ликвидация угольных

шахт мокрым способом привело к изливу высокоминерализованных шахтных вод на поверхность, смешению их с подземными и речными водами. В результате этих процессов произошло повсеместное подкисление и засоление поверхностных и подземных вод, загрязнение их сульфатами и тяжелыми металлами. Негативно на состояние почвенного покрова, атмосферы и поверхностных вод влияют и породные отвалы.

Таким образом, на примере Восточного Донбасса мы имеем дело с характерным примером природно-техногенной геохимической региональной аномалии, в пределах которой природно-климатические, геологические и физико-географические условия в сочетании с существующими здесь техногенными факторами, обусловленные, 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.

На примере фоновых концентраций компонентов речных вод и элементного состава почв на различных почвоматеринских породах заметна разница в загрязненности природных сред Восточного Донбасса. В пределах обоих водосборов сосуществуют как аномалии, обусловленные природными источниками металлов, так и аномалии, возникшие в результате непосредственного воздействия угледобывающей промышленности. Тем не менее, влияние последней на природную среду будет сильнее выражено именно в бассейне Тузлова. Тем самым, Восточный Донбасс как природно-техногенная геохимически аномальная зона будет неоднородной как в пространственном отношении, так и по степени проявления природных и техногенных факторов, что и находит свое отражение в состоянии компонентов окружающей среды.

При этом среди последних для нас наибольший интерес представляют донные отложения, которые благодаря своим свойствам фиксируют все изменения геохимических условий в пределах водосборных площадей, что делает их надежным индикатором техногенного воздействия на речные воды.

## 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Материалы исследования

Объектом исследования выступают 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 года. 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). Схема расположения створов отбора проб представлена на рисунке 2.

В рамках работы также изучено распределение химических элементов по вертикальному разрезу донных отложений с целью выявления временной динамики их загрязненности. Для этого были отобраны четыре колонки донных отложений: в устьевом участке реки Малая Каменка, среднем течении реки Большая Гнилуша; устьевом створе реки Атюхта и верхнем течении реки Большой Несветай (приток Керета). В среднем створе реки Большая Гнилуша мощность осадка составила 43 см, в устьевом створе реки Малая Каменка – 28 см; в устьевом створе реки Атюхта – 42 см, в притоке Керета – 40 см.

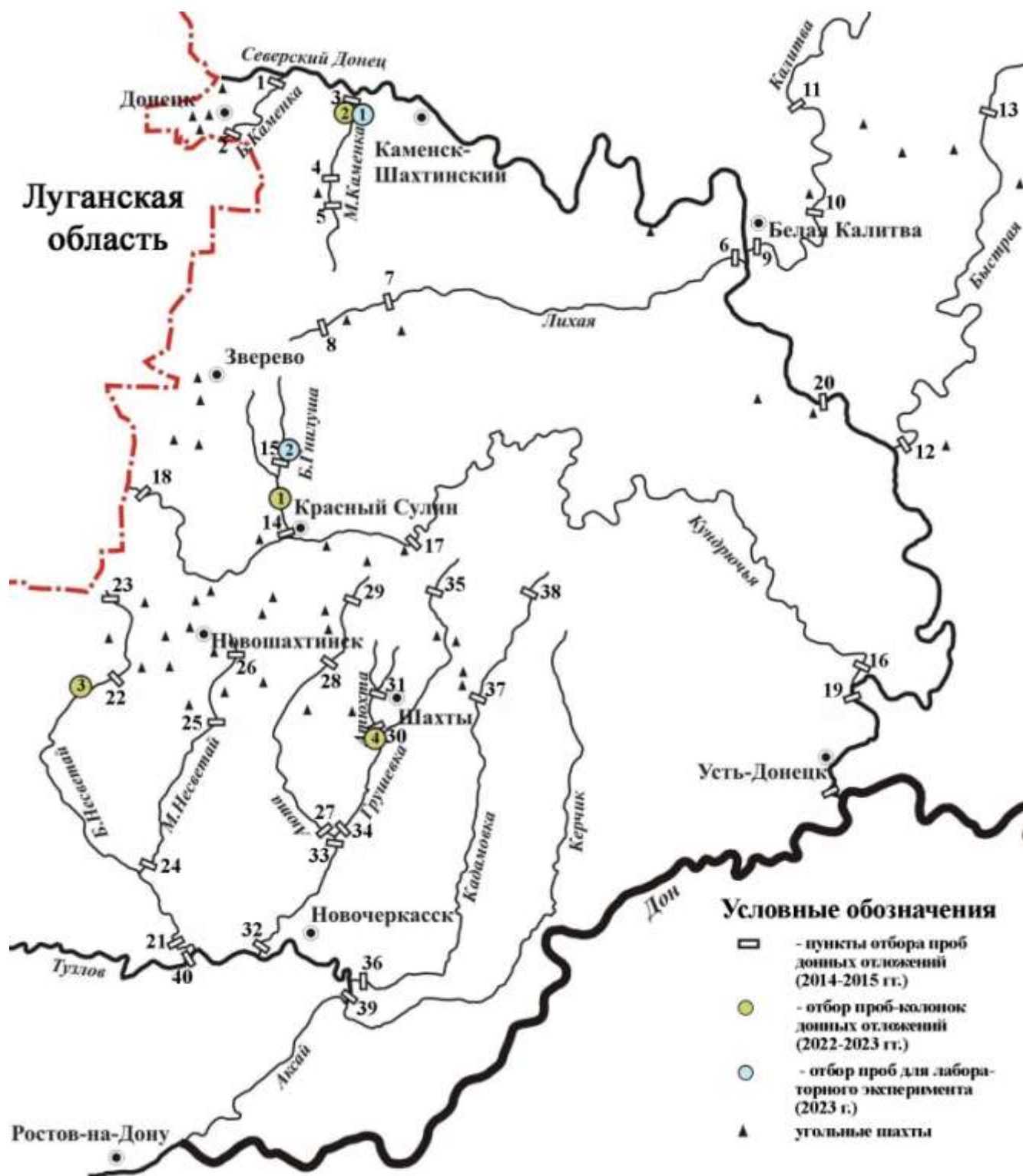


Рисунок 2 – Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором по [42])

Для оценки возможного вторичного загрязнения водной среды проведен лабораторный эксперимент по изучению процессов в системе «донные отложения – вода». В рамках предыдущих исследований проводился эксперимент по

изучению взаимодействия донных осадков с водой и миграции элементов в системе «донные отложения – вода», однако он затрагивал только реки бассейна Тузлова [99]. С учетом физико-географических особенностей и разного уровня техногенной нагрузки на реки двух бассейнов возникла необходимость произвести аналогичный эксперимент для рек бассейна Северского Донца. Объектами исследования являются образцы речной воды и донных отложений рек Малая Каменка и Большая Гнилуша.

## **2.2 Методика исследования**

При проведении исследования особое внимание уделялось малым рекам региона, так как они имеют низкую самоочищающую способность и являются чувствительным индикатором общего экологического состояния водосборных территорий. Именно на водосборах малых рек начинают формироваться негативные изменения в окружающей природной среде.

Чтобы отразить уровень техногенного воздействия на донные отложения изучаемых рек и в целом на водосборы, в пределах каждой реки выбирали по 2-3 створа. Опробование производилось в верховьях рек, на участках выше влияния источников загрязнения; в низовьях рек для оценки суммарного влияния различных техногенных источников загрязнения на водосборах, а также в районах расположения объектов угледобывающей промышленности (действующие и ликвидированные шахты, места сброса шахтных вод и т.п.).

Отбор проб для проведения эколого-геохимических исследований донных отложений проводили согласно нормативным документам (ГОСТ 17.1.5.01-80) с использованием дночерпателя и ручных пробоотборников. Масса отбираемых проб в каждом створе составляла 1000-1500 г.

В связи с неоднородностью донных отложений в каждом створе производили отбор нескольких проб, обычно от 3 до 5. Опробование донных отложений осуществлялось преимущественно из верхнего слоя мощностью 10-20 см. Предполагается, что именно в этом диапазоне содержащиеся в донных

отложениях загрязняющие вещества будут наиболее активно взаимодействовать с водной толщей рек. На небольших и неглубоких водотоках отбирали пробы по поперечному профилю реки, на средних – у уреза воды в местах видимой аккумуляции наносов.

Для изучения распределения элементов по вертикальному разрезу образцы донных осадков извлекались отборником колонок открытого гравитационного типа с внутренним диаметром 100 мм. С учетом того, что донные отложения характеризуются одинаковыми текстурно-структурными особенностями, отбор проб осуществлялся через 5 или 10-см интервал. Всего было отобрано 18 проб.

После морфологического описания отобранные пробы донных осадков высушивались до воздушно-сухого состояния и передавались в лабораторию для определения их гранулометрического, минерального и химического составов. 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.

Как известно, главными факторами, определяющими адсорбционную способность донных грунтов, является содержание органического вещества и частиц размером меньше 0,01 мм, входящих в состав глинистой фракции. Поэтому для того, чтобы охарактеризовать и провести сравнительную оценку уровней загрязненности донных отложений рек двух бассейнов, был проведен анализ распределения микроэлементов в специально выделенной пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса.

Из смешанных проб выделяли пелитовую фракцию путём многократного взмучивания традиционным методом Сабанина при температуре суспензии 15 °С [56]. Так как частицы разной размерности имеют различную скорость осаждения, получаемая в процессе взмучивания донных осадков суспензия

содержит в себе преимущественно частицы размером  $<0,01$  мм. Затем и пелитовая, и песчано-алевритовая части пробы высушивались. Результаты выхода пелитовой фракции выражались в процентах по массе на сухое вещество.

Подготовленные подобным образом пробы передавались в лабораторию для определения содержаний тяжелых металлов. Первоначально, с помощью методов приближенно-количественного спектрального анализа получены результаты для широкого набора элементов (Mn, Ni, Co, Ti, V, Cr, Mo, Zr, Nb, Cu, Pb, Ag, Bi, Zn, Sn, Ga, Be, Sb, Y, Yb, P, Li, Sr, Ba), затем для наиболее значимых (Fe, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Co) концентрации определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2АТ». Анализы на выбранные металлы были выполнены согласно методике количественного химического анализа ИСАМ № 155-ХС и ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002 (изд. 2011 г.) [67, 82].

Валовые пробы и выделенные из них пелитовые фракции, полученные при изучении вертикального разреза донных осадков, также передавали в лабораторию для определения содержаний основных породообразующих оксидов и микроэлементов (Fe, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Co, Sr) методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа с помощью спектрометра СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM. Определения выполнены сотрудником кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии Биологии и биотехнологии Южного федерального университета А. К. Шерстневым.

Изучение ассоциации аутигенных микроминералов выполнено методами электронно-зондовых исследований, обеспечивающих получение данных о строении и составе агрегатов, габитусе и элементном составе кристаллов минералов. Анализировались образцы илов, нанесенные на предметные стекла в виде суспензии. Измерения выполнены 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 к.г.-м.н. Ю.В. Попова. «Поверхность образцов напылялась углеродом.

Изображения получены с использованием детектора *BE*-кольцевого детектора отраженных электронов сцинтиляторного типа (*YAG* кристалл), обеспечивающего получение информации о фазовой и химической неоднородности материала. Элементный состав минеральных фаз приведен в виде энергетических спектров (*EDX*), поскольку загрязнённость поверхности пелитовыми микрочастицами, наличие сростаний и неровность поверхности исключают проведение количественного микроанализа (аналитик – доцент Ю.В. Попов) » [38, с. 104-105]. Кроме того, для отдельных проб выполнен рентгенофазовый анализ с использованием автоматического рентгеновского дифрактометра общего назначения ДРОН-7 (НПП «Буревестник»), что позволило выявить особенности строения отдельных минералов.

Обработка аналитических данных производилась при помощи программы *Microsoft Excel 2007*. Построение картосхем и оформление иллюстративного материала выполнено в программе *QGIS 3.16.16*.

Картосхемы пространственной изменчивости химического состава донных отложений, минерального состава и интегрального показателя загрязнённости донных отложений выполнены в программе *QGIS* с использованием функции «*Интерполяция IDW*» методом обратно-степенных расстояний. Классификация и ранжирование значений для картосхем изменения содержания основных минералов тяжелой фракции выполнено методом равных интервалов. Для классификации значений интегрального показателя загрязнённости на соответствующей картосхеме использована предлагаемая в настоящей работе оценочная шкала. Для картосхем распределения содержания элементов в валовых пробах и пелитовой фракции донных отложений в основе классификации лежат значения, кратные кларковым, чтобы наглядно представить участки с аномальными содержаниями того или иного элемента.

### **2.3 На пути к разработке интегрального показателя загрязненности донных отложений водных объектов техногенно преобразованных территорий**

В исследованиях российских и зарубежных авторов в настоящее время большое внимание уделяется проблемам методологии оценки состояния донных отложений речных систем. В таких исследованиях рассматриваются различные геохимические индексы (показатели), позволяющие оценить уровень загрязненности донных отложений рек.

Среди исследователей донных отложений (ДО) в России наиболее часто используемым показателем уровня загрязненности донных отложений является суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ), предложенный и описанный в работах Ю.Е. Саета [101] и Е.П. Янина [123].

Расчет  $Z_c$  проводится в два этапа. В первую очередь, для характеристики техногенных геохимических аномалий в донных отложениях рек вычисляют коэффициенты концентрации по всем изучаемым химическим элементам, данный показатель характеризует степень накопления металла в донных отложениях относительно фонового содержания и рассчитывается по следующей формуле (1):

$$K_c = \frac{C_i}{C_{фон}}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – средняя концентрация металла в донных отложениях на исследуемом участке (створе) реки,  $C_{фон}$  – содержание данного металла в фоновом створе реки (в ее верховье). При этом за минимальную величину, характеризующую геохимическую аномалию, принято значение содержания элемента, превышающее фоновое в 1,5 раза и выше [123].

На втором этапе рассчитывают суммарный показатель загрязнения  $Z_c$ , который представляет собой сумму коэффициентов концентрации ( $K_c$ ) (за вычетом фона) элементов, входящих в геохимическую ассоциацию аномальных содержаний, по следующей формуле (2):

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n-1) \quad (2)$$

где  $n$  – число элементов, для которых коэффициент концентрации превышает 1,5 (входящих в геохимическую ассоциацию) [101].

Для оценки техногенного загрязнения рек по интенсивности накопления металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса используется ориентировочная шкала, представленная в таблице 4 [101].

В ряде исследований авторы пытаются модернизировать суммарный показатель загрязнения, устранить недостатки этого метода оценки. Одним из них является неоднозначное количество элементов, которое может использоваться при расчете. Иными словами, по одной и той же шкале предполагается давать оценку как для 8 элементов, так и для 30, при этом результаты будут значительно отличаться, что не всегда будет соответствовать реальному состоянию донных отложений.

Таблица 4 – Ориентировочная шкала оценки уровня загрязнения водных систем [101]

Уровень загрязнения	$Z_c$ токсичных элементов в донных отложениях	Содержание токсичных элементов в воде
Слабый	Менее 10	Слабоповышенные относительно фона
Средний	10–30	Повышенные относительно фона; эпизодическое превышение ПДК
Сильный	30–100	Во много раз выше фона; стабильное превышение отдельными элементами уровней ПДК
Очень сильный	Более 100	Практически постоянное присутствие многих элементов в концентрациях выше ПДК

В работе Н.И. Куракиной анализируется модифицированный суммарный показатель загрязнения (м-СПЗ) для донных осадков (или уточненный суммарный

показатель концентрации ( $Z_y$ ). м-СПЗ рассчитывается для данной пробы по всем анализируемым элементам согласно следующей формуле (3):

$$Z_y = \sum_{i=1}^n K_K - \log_2 n, \quad (3)$$

где  $K_C$  – коэффициент концентрации,  $n$  – число анализируемых элементов [53].

При этом автор статьи предлагает учитывать именно все анализируемые элементы, а не только те, для которых концентрация превышает фоновое содержание. «Логарифмический закон выбран в связи с тем, что отклик биоты на суммарное воздействие множества факторов логарифмический, что позволяет живым системам поддерживать свой гомеостаз» [53, с. 75].

Ориентировочная оценочная шкала уровней загрязнения соответствует стандартной шкале для  $Z_C$ , единственное различие – в учете только элементов первого и второго классов опасности, а не всех тех, для которых наблюдается превышение фона.

В работе ученых из Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан рассматривается возможность применения алгоритма расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) для комплексной оценки загрязненности донных отложений на примере тяжелых металлов [8].

Предлагается использовать частотные характеристики рядов данных о содержании отдельных тяжелых металлов в донных осадках, балльную оценку этих характеристик, их обобщение и приведение их к соответствующим классам чистоты, аналогично методике расчета УКИЗВ, но с учетом закономерностей и особенностей накопления загрязняющих веществ в донных отложениях. Комплексными показателями качества отложений, в соответствии с предлагаемой методикой, являются удельный комбинаторный индекс загрязненности донных отложений (УКИЗДО), класс качества и степень загрязненности донных осадков [8].

«Уровень загрязненности оценивается относительной характеристикой, рассчитанной сопоставлением фактических концентраций и соответствующих им

фоновых значений (региональных нормативов), при этом аддитивность действия различных металлов, при их одновременном присутствии, так же как и в расчете УКИЗВ, реализована суммированием отдельных показателей, оценивающих вклад каждого из них. Помимо идентичной системы формализации оцениваемых параметров УКИЗВ и УКИЗДО для совместимости обеих оценок применена аналогичная градация классов чистоты, реализованная в виде пяти основных и трех дополняющих градаций ... с градацией баллов от 0 до 4» [8, с. 53].

В работе И.И. Косиновой и Т. В. Соколовой также затрагивается важный вопрос определения исходных фоновых величин, которые следует использовать при оценке. В ходе исследования не только применяются различные показатели, но и сравниваются результаты оценки, полученные с использованием разных исходных уровней содержаний химических элементов, а именно «фоновых показателей почв городских территорий, кларков для земной коры, ПДК/ОДК валовых форм содержания тяжелых металлов в суглинистых почвах, условно фоновых концентраций, полученных в результате анализа проб донных отложений верховья Воронежского водохранилища» [50, с. 117].

В результате исследования авторы приходят к выводу о том, что «использование кларковых значений и содержаний элементов в почвах не позволяет дать достоверную оценку экологического состояния водоема» [50, с. 120]. В то же время оценка состояния донных отложений должна основываться на использовании условно фоновых значений.

В зарубежной литературе существует два основных подхода при определении величин фоновых концентраций при оценке уровня загрязненности уровня донных отложений. Первый предполагает использование геологических кларков, т.е. средних содержаний элементов в земной коре или какой-либо её части. Сущность второго подхода состоит в выделении некоторых фоновых или доиндустриальных величин содержаний элементов, что позволяет подчеркнуть все локальные особенности.

В работе ученых из Новой Зеландии [126] достаточно обоснованно указывается различие этих подходов. По мнению исследователей, наиболее

правильным и корректным будет получить фоновые значения элементов в донных отложениях, отобрав пробу нетронутых, доиндустриальных осадков, расположенных на бóльшей глубине . Данный подход лучше всего работает в районах, относительно недавно подвергшихся антропогенному и промышленному воздействию.

При этом они обращают внимание, что в странах с долговременным влиянием промышленности, загрязнение тяжелыми металлами может существовать в донных отложениях на значительных глубинах, что либо затрудняет отбор не затронутых воздействием проб донных отложений, либо вовсе делает это невозможным. Поэтому в таких случаях следует использовать в качестве фоновых значений кларки земной коры, осадочных пород или континентальных глинистых сланцев, а также фоновые содержания элементов, полученных в результате аналогичных исследований.

В зарубежных исследованиях авторы используют более широкий ряд показателей состояния донных отложений, основными из которых являются факторы загрязнения (contamination factors) и степень загрязнения (degree of contamination), предложенные в работе [132], и индекс геоаккумуляции (Geoaccumulation index  $I_{geo}$ ), предложенный в работе [141].

Фактор загрязнения ( $C_f$ ) представляет собой отношение концентрации элемента в исследуемых донных отложениях к его доиндустриальному или кларковому содержанию и рассчитывается по формуле (4):

$$C_f = \frac{C_x}{C_b}, \quad (4)$$

где  $C_x$  – содержание элемента в исследуемых донных отложениях,  $C_b$  – среднее кларковое содержание элемента.

Факторы концентрации по элементам для определенного створа используются при подсчете степени загрязненности донных отложений ( $C_d$ ), которая определяется по формуле (5):

$$C_d = \sum_{i=1}^8 C_f^i \quad (5)$$

Для оценки уровня загрязнения донных отложений существует шкала, которая соотносит получаемые значения с качественными характеристиками. Данная шкала может использоваться только в том случае, если для исследования выбрано 8 элементов:

- <8 – слабый уровень загрязнения;
- 8 – 16 – умеренный уровень загрязнения;
- 16 – 32 – значительный уровень загрязнения;
- >32 – очень высокий уровень загрязнения.

Индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ), предложенный Мюллером (1969), позволяет оценить степень загрязнения донных отложений элементам по шкале из семи классов на основе увеличения числовых значений индекса. Этот индекс рассчитывается следующим образом согласно формуле (6):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_x}{1.5 \cdot C_b}, \quad (6)$$

где  $C_x$  – содержание элемента в исследуемых донных отложениях,  $C_b$  – среднее кларковое содержание элемента.

Коэффициент 1.5 вводится для минимизации влияния возможных вариаций фоновых значений содержания элемента в донных отложениях. Оценка загрязнения донных отложений, таким образом, дается по отдельному элементу: от низкого уровня загрязнения донных отложений ( $I_{geo} < 0$ ) до чрезвычайно высокого ( $I_{geo} > 5$ ).

Кроме того, в исследованиях зарубежных авторов достаточно широко используется Pollution Load Index ( $PLI$ ), или индекс суммарного загрязнения. Он представляет собой интегральный показатель уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами, который отражает кратность превышения содержания тяжёлых металлов над фоновыми значениями.

Согласно работе [151],  $PLI$  рассчитывается как геометрическое среднее

факторов загрязнения в соответствии с формулой (7):

$$PLI = \sqrt[n]{C_f^1 \cdot C_f^2 \cdot C_f^3 \dots C_f^n}, \quad (7)$$

где  $n$  – число анализируемых элементов,  $C_f$  – рассчитанные значения факторов загрязнения по одному элементу.

При значении  $PLI \leq 1$  донные отложения классифицируются как незагрязненные, при  $PLI > 1$  – как загрязненные.

В других работах также встречаются попытки осмысления существующих подходов к оценке донных отложений. В исследовании группы ученых из Бразилии [131] предложен новый геохимический индекс с поправкой на гранулометрический состав, который рассчитывается на основе концентрации металла в каждой фракции фоновых отложений. Исследователи из Ирана [142] разработали индекс риска загрязнения, который позволяет учитывать концентрацию металлов в различных лабильных (подвижных) фракциях донных отложений.

Таким образом, в научной литературе описано большое количество подходов к оценке загрязнённости донных отложений водных объектов. При этом часть из них предполагает оценку лишь по отдельным элементам (коэффициент концентрации  $K_C$ , индекс геоаккумуляции  $I_{geo}$  и другие). Наибольший интерес представляют так называемые интегральные показатели, которые позволяют дать оценку уровня загрязнённости донных отложений по совокупному влиянию загрязняющих веществ.

Комплексные методы оценки уровня загрязнённости донных отложений, описанные в исследованиях российских и зарубежных авторов, основываются на расчёте коэффициентов концентрации (суммарный показатель загрязнения) или факторов загрязнения (степень загрязнения Хокансона, индекс суммарного загрязнения  $PLI$ ), что является идентичным по своей сути. Разница между интегральными подходами заключается в количестве элементов, используемых для расчёта, и в определении величины фонового содержания.

К примеру, оценочная шкала суммарного показателя загрязнения Саета и

Янина разработана для учёта не менее 40 химических элементов, в то же время показатель степени загрязнения Хокансона рассчитывается и оценивается на основе содержаний 7 металлов и полихлорированных дифенилов (ПХД) [132]. Особенность модифицированного показателя степени загрязнения, предложенного в работе [126], заключается в том, что сумма факторов загрязнения делится на число исследуемых элементов, благодаря чему шкала оценки может быть использована для любого набора компонентов.

В качестве фонового уровня содержания элемента при изучении донных отложений, как правило, используют либо геохимические кларки [39, 128, 138, 142, 145] земной коры или осадочных пород, либо фоновые (доиндустриальные) величины содержаний элементов [4, 122, 140, 143]. В работе канадских исследователей [136] для определения фоновых концентраций ванадия и никеля используются статистические методы, а в других исследованиях [135, 139] оценка уровня загрязнения донных отложений проведена на основе установленных нормативов качества донных отложений. Есть примеры установления региональных нормативов (предельно допустимых концентраций) металлов для почв техногенно нарушенных территорий [44, 46].

Особое внимание при изучении донных отложений уделяется выбору той части донных отложений, которая позволит получить репрезентативную информацию о степени их загрязнённости. Так, в частности, при расчёте  $Z_C$  предполагается использование концентраций элементов валовой пробы. Напротив, Хокансон в своей работе [133] указывает на то, что наибольшая информативность пробы достигается путём её просеивания через сито с размером ячеек 63 мкм. В современных исследованиях загрязнённости донных отложений предпочтение отдаётся либо уже упомянутой размерности < 63 мкм [126, 130, 150], либо < 2 мм [143, 144, 153].

Обращает на себя внимание, что в основе всех методов интегральной оценки уровня загрязнённости донных отложений лежат коэффициенты концентрации элементов. Однако здесь стоит упомянуть о том, что коэффициент концентрации характеризует лишь уровень аномальности содержаний тех или

иных элементов, но не степень загрязнённости донных отложений, которая предполагает оценку их опасности для водных экосистем в целом и человека.

По этой причине в ряде работ при оценке состояния донных отложений вводятся коэффициенты, учитывающие токсичное действие на живые организмы [25, 123, 132]. В работах [79, 123, 125] описан показатель санитарно-токсикологической опасности  $Z_{СТ}$ , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации элементов 1 и 2 классов опасности. Кроме того, похожий подход используется и при оценке почв – суммарный показатель токсичного загрязнения СПТЗ [102].

При этом очень редки попытки исследователей привлечь к оценке факторы, влияющие на содержание и распределение тяжёлых металлов в системе «донные отложения – вода» и, тем самым учесть опасность вторичного загрязнения водной толщи.

Исходя из приведенных выше существующих методик и подходов, можно сделать вывод, что в настоящее время в отечественной и мировой практике не существует единого подхода к оценке степени загрязнённости донных отложений водных объектов. В ряде стран существуют установленные нормативы содержания элементов в донных отложениях, в то время как в России ПДК загрязняющих веществ для донных отложений пока не установлены. Различия природно-климатических условий водных объектов и физико-химических особенностей самих донных отложений затрудняют нахождение единых оценочных критериев, дающих корректные результаты для донных отложений водных объектов на всей территории РФ.

Разница между существующими подходами заключается также и в числе анализируемых элементов, хотя это напрямую влияет на получаемую количественную и качественную характеристику степени загрязнённости. К тому же, наиболее часто используемые показатели учитывают только химический состав донных отложений, при этом другие факторы, влияющие на характер и уровень загрязнённости, остаются неучтёнными.

Поэтому, на основе изученного российского и международного опыта

оценки уровней загрязненности донных отложений, а также с учетом специфики объекта исследований – речных отложений в углепромышленном районе – была сформулирована собственная методика интегральной оценки уровня загрязненности донных отложений. Система такой оценки, на наш взгляд, должна основываться на следующих принципах.

1. Работа с однородным материалом – пелитовой фракцией ( $< 0,01$  мм) донных отложений. Как известно, донные отложения рек вообще характеризуются различным гранулометрическим составом. Так, в пределах исследуемого района выделяются реки преимущественно песчаного (река Быстрая – 91,8 % выход песчано-алевритовой фракции) и преимущественно глинистого (река Большая Гнилуша – 87,8 % выход пелитовой фракции) составов [18]. Тем самым использование концентраций элементов в специально выделенной пелитовой фракции позволяет корректно сравнивать между собой уровень загрязненности гранулометрически неоднородных рек и их участков.

Второй аргумент в пользу использования пелитовой фракции связан с её физико-химическими особенностями. «Содержание металлов в различных гранулометрических фракциях возрастает с уменьшением размера фракции, что обусловлено увеличением удельной площади поверхности частиц. По этой причине количество пелитовой фракции и её химический состав будут наиболее точно и информативно отражать уровень загрязнения донных отложений в целом» [96, с. 82].

2. Использование кларков глин и глинистых сланцев в качестве геохимического фона. Как указывалось ранее, «в районах, подверженных длительному техногенному воздействию, отбор фоновых проб либо затруднён, либо вовсе невозможен. В частности, для рек Восточного Донбасса загрязнение донных отложений будет происходить не только в результате осаждения элементов из речных вод, но и за счёт их поступления с шахтными и подземными водами. Такие процессы зачастую происходят и в верховьях рек, что исключает возможность использования верхних створов в качестве фоновых» [96, с. 82]. Аналогичная проблема сложности определения фоновых параметров существует

и для почв Ростовской области, поскольку «водораздельных участков с нетронутыми ландшафтами практически не осталось» [44, с. 87].

Пелитовая фракция представляет собой совокупность частиц размером менее 0,01 мм, что в целом соответствует размерности глин, илов и аргиллитов. Несмотря на то, что пелитовая фракция включает в себя не только собственно глинистые минералы, но и частицы другого минерального состава такой же размерности, мы полагаем, что наиболее корректным будет использование в качестве фоновых значений кларки континентальных глин и глинистых сланцев [23].

3. Учёт класса опасности элемента в окружающей среде. «Оценка уровня загрязненности донных отложений без учета степени токсичности элементов представляет собой лишь выявление геохимических аномалий, но не их опасность для пресноводных экосистем» [95, с. 305]. По этой причине имеет смысл внести в формулу добавочный коэффициент, позволяющий учесть класс опасности того или иного элемента. Тем самым значение, получаемое при расчёте показателя, будет зависеть и от степени опасности элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

4. Учёт потенциального риска вторичного загрязнения воды. Как указывает Янин Е.П. [124], одним из основных процессов, способствующих поступлению металлов из донных осадков в водную толщу, является взмучивание донных отложений, в результате которого происходит выделение элементов из раствора иловых вод и тонких частиц. Их перемещение или накопление на определённых участках сопровождается резким снижением качества вод.

Важно подчеркнуть, что основным носителем загрязнения является именно пелитовая фракция, в которой за счёт высокой удельной площади поверхности частиц тяжелые металлы будут содержаться в более высоких концентрациях. В исследовании Мартыновой [63] указывается, что взмучивание донных отложений приводит к росту концентрации тяжелых металлов и органического вещества в воде. В работах [129, 135, 143] показано, что имеется положительная корреляция содержания тяжёлых металлов и других загрязнителей в осадках с количеством

тонкодисперсной фракции.

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 [123]. 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. «Это позволит использовать одинаковую оценочную шкалу для выявления степени загрязнённости донных отложений независимо от числа исследуемых элементов» [96, с. 83].

Учитывая указанные выше принципы, формула интегрального показателя загрязнённости донных отложений (ИПЗ<sub>до</sub>) выражается следующим образом (8):

$$\text{ИПЗ}_{\text{до}} = \log_{10}(PF) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_c \cdot K_T}{n}, \quad (8)$$

«где  $K_T$  – коэффициент, зависящий от класса опасности элемента;

$K_C$  – коэффициент концентрации элемента, представляющий собой отношение содержания элемента в пробе к его фоновому (кларковому) содержанию;

$n$  – число исследуемых элементов, для которых  $K_C > 1,5$ ;

$PF$  – доля пелитовой фракции, %» [96, с. 83].

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 [25], поэтому логичным будет и выбор соответствующих классов опасности элементов.

В соответствии с нормативами качества вод водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России № 552 от 13 декабря 2016 г., с изм. от 22.08.2023 г.), для элементов четырёх классов опасности были присвоены следующие коэффициенты (таблица 5).

Таблица 5 – Характеристика опасности элементов для водных экосистем [85]

Класс опасности элемента	Элементы	Коэффициент класса опасности $K_T$
4	Fe, Mn	0,5
3	Cr, Ni, Cu, Co, Zn	1,0
2	Pb	1,2
1	Hg	1,5

Как показывают наши исследования, наилучшим образом зависимость содержания элементов в донных отложениях от доли пелитовой фракции описывается логарифмическим законом (рисунок 3). Поэтому коэффициент содержания пелитовой фракции в итоговой формуле будет иметь вид  $\log_{10}(PF)$ , где  $PF$  – доля пелитовой фракции, %. Другими словами, коэффициент содержания пелитовой фракции будет принимать значения меньше 1, если её доля в осадке составляет менее 10% – для преимущественно песчаных отложений. Для донных осадков с долей пелитовой фракции менее 1% значение данного коэффициента рекомендуется принимать равным 0 во избежание отрицательных значений. При максимальном выходе пелитовой фракции – 100% значение коэффициента будет равным 2.

Для ИПЗ<sub>ДО</sub> нами была разработана оценочная шкала, основанная на сопряжённом анализе результатов наших исследований [42, 154]. Уровни загрязнённости и соответствующие им диапазоны значений установлены нами исходя из результатов оценки степени загрязнённости донных отложений и речных вод Восточного Донбасса по показателям  $Z_C$ , степени загрязнения Хокансона и УКИЗВ. В таблице 6 показана итоговая оценочная шкала ИПЗ<sub>ДО</sub>.

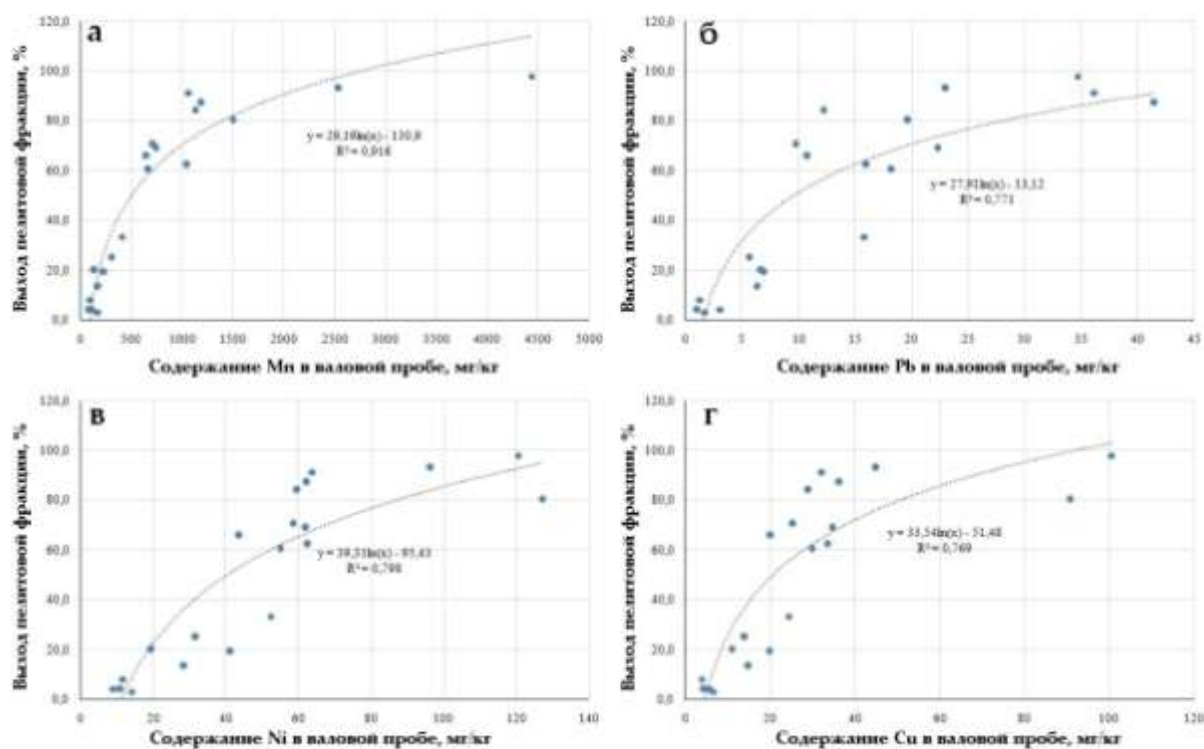


Рисунок 3 – Зависимость содержания марганца (а), свинца (б), никеля (в), меди (г) в валовых пробах донных отложений рек Северского Донца (мг/кг) от выхода пелитовой фракции (%)

Таблица 6 – Оценочная шкала уровня загрязнённости донных отложений рек по ИПЗ<sub>до</sub> [96]

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

Как известно, состав и уровень загрязненности донных отложений во многом отражает уровень загрязненности водной среды. По этой причине степень взаимосвязи результатов оценки уровня загрязненности донных отложений и речных вод будет показывать, насколько тот или иной показатель оценки информативен.

Несмотря на то, что результаты оценки уровня загрязненности донных отложений рек Восточного Донбасса, полученные с использованием разных

показателей, во многом схожи, имеет смысл сопоставить их между собой. Для этого был проведен корреляционный анализ между данными об уровнях загрязненности речных вод Восточного Донбасса по УКИЗВ за 2014-2015 гг. [42] и уровнях загрязненности донных отложений на тех же самых створах, полученных с использованием показателей  $Z_c$ ,  $C_d$  и ИПЗ<sub>до</sub> [96]. Среди изучаемых рек из анализа были исключены данные по реке Кадамовка, так как перед отбором проб и проведением наших исследований были выполнены плановые работы по очистке русла реки в рамках госпрограммы «Охрана окружающей среды и рациональное природопользование» в Ростовской области. В результате чего уровень загрязненности речных вод сохранился экстремально грязным, в то время как донные осадки характеризуются слабым уровнем загрязнения.

Результаты анализа приведены в таблице 7. Как видно из данной таблицы, наибольший коэффициент корреляции отмечен между значениями УКИЗВ и ИПЗ<sub>до</sub>, что указывает на заметную положительную взаимосвязь (по шкале Чеддока) уровней загрязнения донных отложений и речных вод исследуемого района. Затем, немного меньшее значение коэффициента корреляции наблюдается между значениями степени загрязнения Хокансона  $C_d$  и УКИЗВ. В данном случае она также остается заметной и положительной. Выявленная взаимосвязь между значениями УКИЗВ и  $Z_c$  является самой слабой из представленных. Можно сделать вывод о том, что среди показателей степени загрязненности донных отложений предлагаемый в настоящей работе ИПЗ<sub>до</sub> в большей степени отражает уровень загрязненности речных вод, и, следовательно, обладает лучшими индикаторными свойствами.

Таблица 7 – Коэффициенты корреляции показателей уровня загрязненности речных вод и донных отложений (составлено автором)

<i>Показатель</i>	<i>Коэффициент корреляции с УКИЗВ</i>
$Z_c$	0,40
ИПЗ <sub>до</sub>	0,65
$C_d$	0,54

Таким образом, в настоящее время в отечественной и мировой практике не существует единого подхода к оценке степени загрязнённости донных отложений водных объектов. В основе наиболее часто используемых методов интегральной оценки уровня загрязнённости донных отложений лежат коэффициенты концентрации элементов, которые характеризуют лишь уровень аномальности содержания тех или иных элементов без учета их опасности для водных экосистем в целом и человека.

Основными отличительными чертами предлагаемого нами ИПЗ<sub>ДО</sub> 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. Результаты корреляционного анализа показали, что среди показателей степени загрязнённости донных отложений предлагаемый в настоящей работе ИПЗ<sub>ДО</sub> в большей степени отражает уровень загрязнённости речных вод, и, следовательно, обладает лучшими индикаторными свойствами.

### 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 псаммит-алеврит-пелитовым материалом [39, 148]; и значительно различаются в пределах речных бассейнов: от пелитовых илов с выходом пелитовой фракции более 90 % (отдельные створы рек Большая Гнилуша, Кундрючья, Тузлов и Малый Несветай) до алеврито-песчаных осадков (доля пелитовой фракции < 10 %, некоторые створы рек Калитва, Быстрая, Атюхта). При этом в донных отложениях рек бассейна Северского Донца, в целом, преобладает песчано-алевритовая фракция (2-97 %, в среднем 51 %) а в бассейне Тузлова – пелитовая (4-91 %, в среднем 67 %).

Рассмотрим подробнее минеральный состав донных отложений рек Восточного Донбасса. В таблице 8 приведены содержания основных минералов легкой фракции речных осадков бассейна Северского Донца. Как уже было сказано, в среднем по бассейну содержание песчано-алевритовой фракции незначительно больше, чем пелитовой. При этом заметна дифференциация в соотношении этих фракций в зависимости от водности и крупности реки.

Так, 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 – глинистого вещества, кварца, полевых шпатов и т.д. Это подтверждается графиком на рисунке 4, где представлено распределение содержаний основных минералов легкой фракции в донных отложениях рек разных категорий.

Таблица 8 – Минеральный состав легкой фракции донных отложений бассейна Северского Донца

Река	№ створа	Пелитовая фракция						Песчано-алевритовая фракция					
		Выход фракции, %	Глинистое вещество	Кварц	Уголь	Кальцит	Современное органическое вещество	Выход фракции, %	Кварц	Полевой шпат	Уголь	Карбонаты	Современное органическое вещество
Большая Каменка	1	69,1	44,2	6,9	4,8	4,1	5,5	30,9	17,8	1,5	3,0	1,8	3,3
	2	87,2	58,4	4,4	6,1	2,6	12,2	12,8	5,8	ред	2,4	0,1	3,7
Малая Каменка	3	25,1	17,6	2,3	ред	1,3	2,0	74,9	51,2	5,2	ред	1,5	11,2
	4	60,5	44,8	3,0	2,4	4,2	2,4	39,5	14,5	1,6	10,5	0,8	3,5
	5	33,5	22,1	2,4	1,7	4,0	2,4	66,5	31,1	3,3	6,6	6,6	6,6
Лихая	6	65,9	33,6	3,3	ред	21,1	5,3	34,1	11,8	1,7	0,7	8,1	2,7
	7	93,1	64,2	1,9	ред	11,2	14,9	6,9	1,0	ред	0,1	3,3	2,2
	8	80,3	53,8	4,0	3,2	7,2	9,6	19,7	12,2	1,4	1,2	0,6	2,1
Калитва	9	19,2	14,2	1,3	ред	1	1,7	80,8	58,7	3,2	0,8	3,2	8
	10	4,1	1,9	ред	ред	2,1	ред	95,9	82,3	2,9	ред	4,8	1,9
	11	8,2	5,8	0,4	ред	1,0	0,6	91,8	78,8	2,8	ред	0,9	3,7
Быст-рая	12	13,3	8,2	0,4	1,6	0,1	2,7	86,7	46,7	1,7	17,3	ред	10,4
	13	3,1	2,2	0,1	0,2	ред	0,6	96,9	67,8	2,9	ред	6,8	5,8
Большая Гнилуша	14	84,2	56,4	3,4	1,7	5,9	13,5	15,8	6,9	0,7	0,4	0,5	4,1
	15	91,4	53,0	6,4	1,8	13,7	12,8	8,6	3,1	0,4	0,2	2,3	2,2
Кунд-рючья	16	70,5	50,8	2,8	ред	7,1	6,5	29,5	19,4	1,8	ред	3,0	1,8
	17	62,5	43,1	2,5	1,2	8,1	5,0	37,5	21,3	1,9	1,5	4,5	1,9
	18	98,0	60,7	4,9	4,9	8,82	14,7	2,0	1,0	0,04	0,20	0,2	0,5
Северский Донец	19	4,3	2,9	0,2	ред	0,9	0,2	95,7	71,6	3,8	ред	9,5	3,8
	20	20,1	12,3	1,0	ред	3,2	2,0	79,9	57,2	4,0	ред	8,0	3,2
Среднее по бассейну		49,7	32,5	2,7	2,7	5,7	6,0	50,3	33,0	2,3	3,5	3,5	4,1

Заметно снижение доли пелитовой фракции и, вместе с ней, содержания глинистого вещества в направлении от малых рек к крупным, в этом же

направлении происходит уменьшение суммарного содержания органического вещества. Содержание кварца, как и следовало ожидать, в донных осадках малых рек невелико, и резко возрастает к средним рекам, и затем – к крупным.

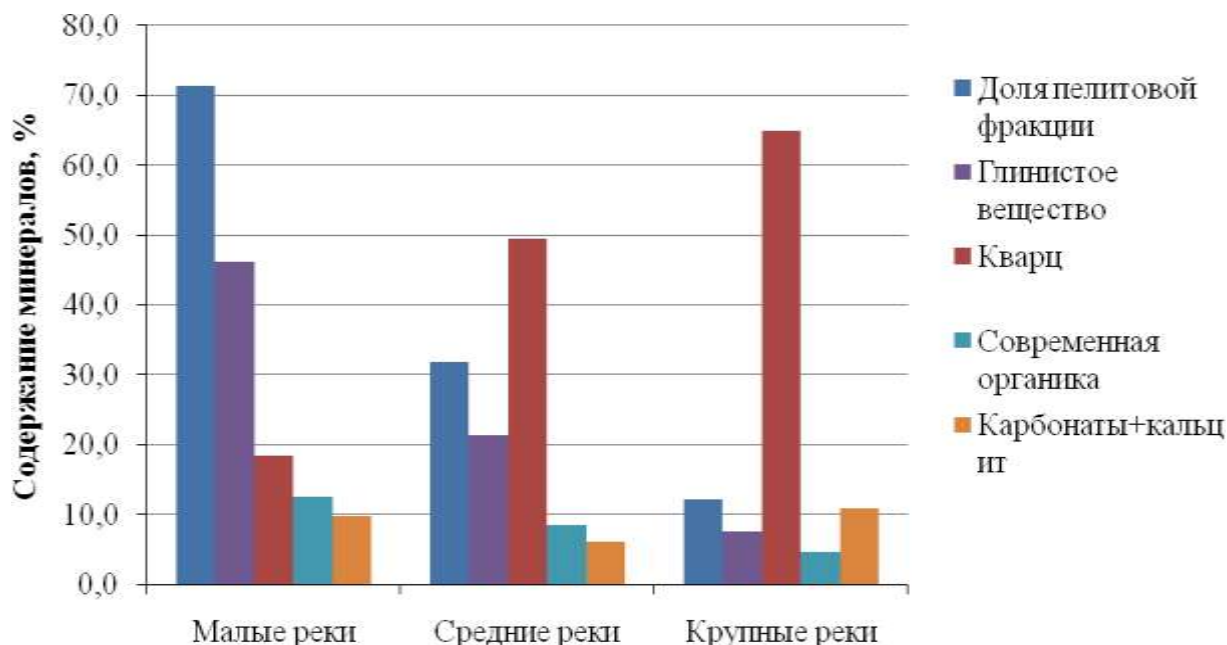


Рисунок 4 – Распределение содержания основных минералов легкой фракции донных отложений рек бассейна Северского Донца в зависимости от категории реки (составлено автором)

Стоит отметить роль органического вещества в донных отложениях рек. С одной стороны, большие количества органики формируются в пределах зон техногенного воздействия, а с другой – высокие содержания органического вещества способствуют установлению восстановительных условий в отложениях, благодаря чему происходят процессы минералообразования. Среди донных отложений рек бассейна Северского Донца наибольшими содержаниями органического вещества как в пелитовой фракции, так и в целом характеризуются створы рек Большая Гнилуша, 16 и 18 створы реки Кундрючья, 7 и 8 створы реки Лихая, а также створ 2 реки Большая Каменка.

В таблице 9 представлены содержания основных минералов легкой фракции речных осадков бассейна Тузлова. По сравнению с бассейном Северского Донца,

здесь значительно выше выход пелитовой фракции и содержание её основных компонентов: глинистого вещества, кальцита и органического вещества современного происхождения.

Таблица 9 – Минеральный состав легкой фракции донных отложений бассейна Тузлова

Река	№ створа	Пелитовая фракция						Песчано-алевритовая фракция					
		Выход фракции, %	Глинистое вещество	Кварц	Уголь	Кальцит	Современное органическое вещество	Выход фракции, %	Кварц	Полевой шпат	Уголь	Карбонаты	Современное органическое вещество
Большой Несветай	21	53,6	34,3	6,4	ред	3,8	6,4	46,4	27,0	6,0	0,1	2,8	6,9
	22	87,7	63,1	1,8	3,0	9,7	9,3	12,3	5,9	1,1	1,8	1,0	0,6
	23	54,7	40,5	4,4	1,0	1,6	3,4	45,3	25,9	1,8	1,3	0,5	0,9
Малый Несветай	24	90,7	43,5	2,7	ред	31,8	10,9	9,3	1,7	0,1	0,1	2,0	5,3
	25	76,3	53,4	7,6	ред	3,8	9,2	23,8	14,7	0,9	0,1	0,7	5,9
	26	14,1	7,1	0,7	ред	3,3	1,4	85,9	46,1	3,4	3,4	10,2	8,5
Аюта	27	73,7	47,9	3,0	ред	11,1	8,1	26,3	11,5	1,0	0,1	2,6	8,6
	28	62,3	40,5	4,4	ред	9,3	5,6	37,7	19,1	2,3	0,1	3,4	4,5
	29	89,4	55,4	4,5	2,0	8,9	15,0	10,6	3,2	0,2	0,6	0,8	5,0
Атюхта	30	62,6	41,3	2,5	4,5	5,0	6,8	37,4	13,7	1,1	5,9	1,5	1,9
	31	4,3	2,8	0,2	ред	0,4	0,9	95,7	35,6	2,8	18,7	3,8	2,8
Грушевка	32	80,1	49,7	8,0	ред	3,2	16,0	19,9	12,8	1,2	0,2	0,6	3,5
	33	60,1	41,5	4,2	1,0	1,8	10,4	39,9	27,4	2,8	0,8	0,8	4,8
	34	87,4	53,3	3,5	1,0	7,0	19,1	12,6	6,4	1,2	0,4	0,5	3,3
	35	74,5	46,2	4,5	3,0	5,2	12,6	25,5	13,6	3,0	3,8	1,0	2,0
Кадамовка	36	65,6	42,0	4,6	ред	3,3	13,1	34,4	14,3	3,1	0,7	2,1	12,0
	37	71,8	47,4	5,7	ред	7,2	8,6	28,2	20,1	2,8	0,6	0,6	1,1
	38	83,0	52,3	4,2	1,0	12,5	9,8	17,0	8,6	0,7	0,8	0,7	0,8
Тузлов	39	59,9	37,2	3,0	0,5	9,6	7,9	40,1	19,9	0,8	2,8	6,0	7,6
	40	90,5	47,0	7,2	ред	15,4	18,1	9,5	1,9	0,1	0,1	1,2	5,7
Среднее по бассейну		67,1	42,3	4,2	1,9	7,7	9,6	32,9	16,5	1,8	2,1	2,1	4,6

В бассейне Тузлова встречаются створы с высокими содержаниями песчано-алевритовой фракции: верхние створы рек Малый Несветай и Атюхта (86 и 96 % соответственно). Причем в этих створах едва ли половину фракции составляет кварц (46 и 36 %) – большая доля песчано-алевритовой фракции приходится на частицы угля, карбонаты, органическое вещество, обломки осадочных пород и др. И это несмотря на то, что практически все реки в бассейне Тузлова относятся к категории малых и характеризуются малой водностью.

Учитывая последнее, имеет смысл сопоставить средние содержания компонентов минерального состава рек бассейна Тузлова и малых рек бассейна Северского Донца. В целом, донные отложения рек бассейна Тузлова характеризуются сопоставимыми содержаниями пелитовой фракции, глинистого вещества, карбонатов и кальцитов по сравнению с малыми реками бассейна Северского Донца (рисунок 4). Содержание органического вещества пелитовой и песчано-алевритовой фракций в донных отложениях рек бассейна Тузлова несколько выше, чем в осадках малых рек бассейна Северского Донца.

Если в случае с минералами легкой фракции многое объясняется природными особенностями самих рек и донных осадков, то в распределении минералов тяжелой фракции принимает участие большее число факторов. Остановимся подробнее на характеристике минерального состава тяжелой фракции.

Для тяжелой фракции речных отложений Восточного Донбасса, как показывают исследования [31, 38, 92], наиболее характерными минералами являются ильменит, гидроокислы железа и магнетит, которые встречаются практически повсеместно.

Как показано в исследованиях д.г.-м.н. В.Е. Закруткина с соавторами, гидроокислы железа в донных отложениях рек «первоначально образуют рентгеноаморфные агрегаты ферригидрита в виде налетов, пленок и волокнистых форм. При дальнейшей дегидратации и понижении редокс-потенциала ферригидрит, как известно, переходит в гидрогетит, гётит, гематит и далее в магнетит» [38, с. 110]. В исследованиях В.Е. Закруткина [31, 38] 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 [38].

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 5) [38, с. 110].

Как показано в исследованиях различных авторов [38, 57, 64, 149], аутигенный магнетит в осадках формируется в результате различных химических и химико-биологических процессов. Биологически индуцированный магнетит образуется как побочный продукт деятельности железоредуцирующих бактерий, в то время, как биологически контролируемый магнетит – как внутриклеточное образование магнитотактических бактерий. Кроме того, в осадках также может встречаться терригенный магнетит, перенесенный в речную сеть и донные отложения в результате выветривания горных пород и почв. Однако, как указывает В.Е. Закруткин, «образование магнетита в донных отложениях Восточного Донбасса осуществляется в открытых условиях при доступе в систему свободного кислорода из придонных слоев речной воды, а также гидроокислов железа из техногенных источников. Присутствие в осадках магнетита в основном в виде характерных для него октаэдрических кристаллов не противоречит гипотезе о его абиогенном и биологически индуцированном происхождении» [38, с. 112]. Таким образом, наличие необходимых для формирования аутигенного магнетита условий, а также форма и размеры наблюдаемых кристаллов указывают нам на то, что в речных осадках Восточного Донбасса происходят процессы образования аутигенного магнетита из гидроокислов железа.

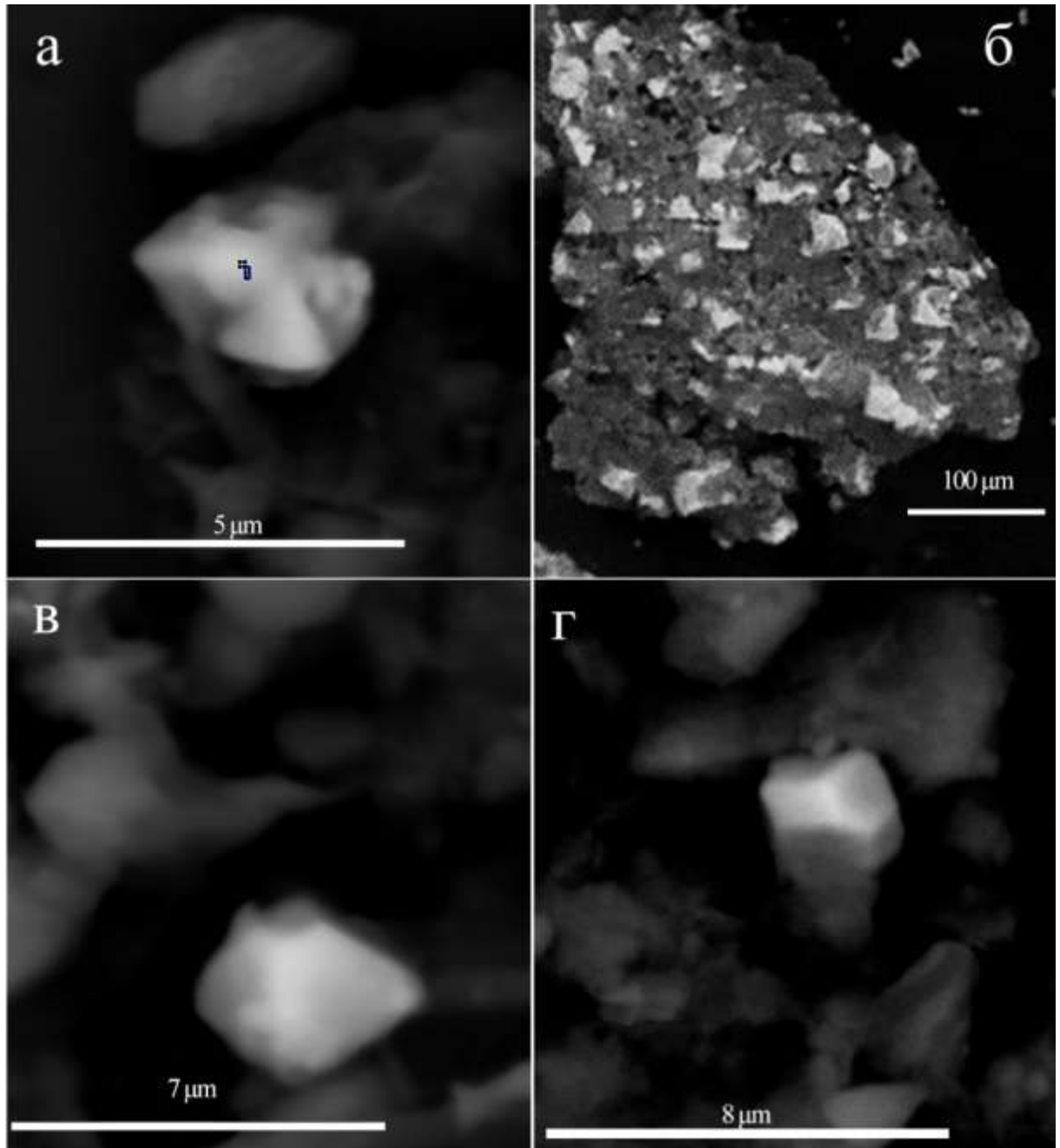


Рисунок 5 – Формы выделений магнетита в донных отложениях рек Восточного Донбасса: а – агрегат кристаллов магнетита; б – мелкие зерна магнетита, сцементированные глинистыми частицами; в – октаэдрический кристалл магнетита; г – ромбододэкаэдрический кристалл магнетита

Сульфиды железа (пирит и марказит) среди рассматриваемых аутигенных минералов характеризуются относительно малой распространенностью, при этом пирит является более распространенным и устойчивым, марказит же встречается

существенно реже. Значительные содержания данных минералов наблюдаются лишь в единичных створах рек Лихая и Тузлов (14 % и 52 %, соответственно).

В исследовании В.Е. Закруткина с соавторами показано, что «в донных отложениях Восточного Донбасса пирит представлен главным образом фрамбоидальными формами – сферическими агрегатами с плотной упаковкой одноразмерных микрокристаллов. ... Размер фрамбоидов варьирует в пределах 5-10 мкм, а величина слагающих его микрокристаллов пирита не превышает 0,5 мкм. Помимо фрамбоидов встречаются одиночные хорошо ограненные октаэдрические кристаллы, а также россыпи микрокристаллов, которые отражают последовательность формирования фрамбоидального пирита от зарождения свободных индивидов до сфероидов и глобул» [38, с. 112-113] (рисунок 6).

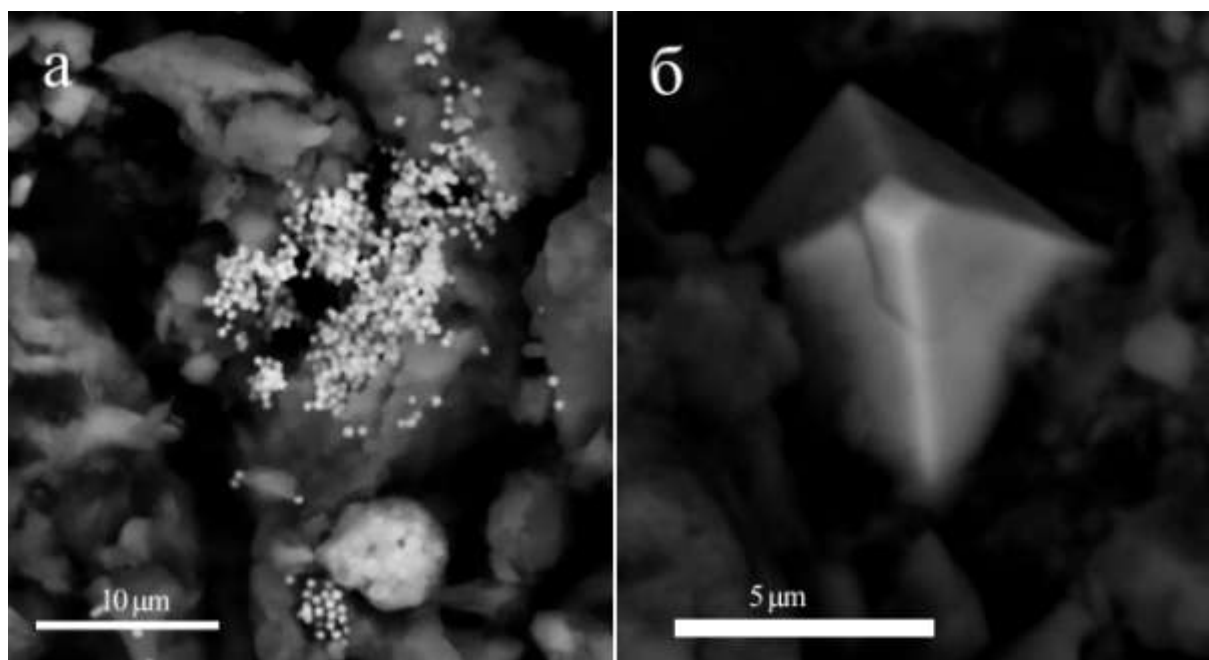


Рисунок 6 – Формы выделений пирита в донных отложениях рек Восточного Донбасса: а – фрамбоид пирита и россыпь мелких кристаллов пирита; б – октаэдрический кристалл пирита

В таблице 10 представлены содержания основных минералов тяжелой фракции речных отложений бассейна Северского Донца. Основными минералами тяжелой фракции в среднем по бассейну являются ильменит (35 %), гидроокислы

железа (23 %) и магнетит (20 %). Наибольшие содержания ильменита отмечены в осадках рек Калитва, Быстрая, Северский Донец, Кундрючья, а также устьевого створа реки Малая Каменка. Другими словами, ильменит характерен для осадков преимущественно средних и крупных рек.

Таблица 10 – Основные минералы тяжелой фракции донных отложений рек бассейна Северского Донца (составлено автором)

Река	№ створа	Выход тяжелой фракции, %	Терригенные минералы, % тяжелой фракции						Аутигенные минералы, % тяжелой фракции		
			Циркон	Ильменит	Кванит	Ставролит	Турмалин	Гранат	Магнетит, гематит	Гидроокислы железа	Пирит, марказит
Большая Каменка	1	1,2	1,7	9,5	0,5	0,9	0,4	0,4	54,0	25,8	ед
	2	0,2	ред	9,8	ед	1,4	1,4	1,4	30,0	39,2	5,0
Малая Каменка	3	0,2	11,0	57,6	2,8	9,6	1,6	8,0	ред	2,4	ед
	4	0,4	ред	6,2	ред	3,1	1,5	1,5	23,0	60,1	ред
	5	0,4	4,6	6,9	1,2	2,8	0,7	1,4	22,3	54,5	ред
Лихая	6	0,4	0,8	18,0	0,8	3,3	0,8	2,5	18,0	46,7	ред
	7	0,1	ред	10,0	ед	3,0	1,0	2,0	ред	53,0	ед
	8	0,3	3,2	6,4	0,5	2,0	0,8	1,6	50,0	17,6	14,4
Калитва	9	0,4	7,4	54,0	3,2	5,8	1,5	5,1	9,0	2,2	-
	10	0,1	ред	42,0	ред	6,0	2,3	5,3	25,0	18,0	ред
	11	0,2	7,2	56,8	4,8	9,6	3,2	6,4	ред	2,4	ред
Быстрая	12	0,2	8,8	63,9	2,4	5,0	2,5	4,2	ред	6,6	ед
	13	0,1	ред	75,0	ред	12,0	4,0	7,0	ред	1,0	-
Большая Гнилуша	14	2,1	ред	6,3	ред	0,2	0,1	0,2	90,0	2,5	ред
	15	0,1	ред	39,5	ред	1,3	0,7	1,3	33,0	20,1	ред
Кундрючья	16	0,1	ред	56,0	ред	7,0	2,0	3,0	ред	30,0	ред
	17	0,2	ред	7,1	ред	1,4	0,7	0,7	29,0	58,9	ред
	18	0,0	4,0	60,0	ред	3,0	2,0	3,0	ред	15,0	7,0
Северский Донец	19	0,3	6,4	57,7	3,1	6,8	2,3	6,0	12,5	1,5	1,0
	20	0,4	4,3	62,3	2,0	6,6	1,7	5,8	7,7	3,3	0,7
Среднее по бассейну		0,4	3,0	35,3	1,1	4,5	1,6	3,3	20,2	23,0	1,4

Наибольшие содержания аутигенных минералов железа отмечены преимущественно в донных отложениях малых рек Большая Каменка, Малая Каменка, Лихая, Большая Гнилуша и 17 створа реки Кундрючья. При этом

максимальное содержание магнетита в тяжелой фракции составляет 90 % и характерно для устьевого створа реки Большая Гнилуша. Среди содержаний гидроокислов железа наибольшее значение выявлено для створа 4 реки Малая Каменка (60 %), а среди содержаний пирита – 8 створ реки Лихая (14 %).

В таблице 11 представлена характеристика минерального состава донных отложений рек бассейна Тузлова. По сравнению с бассейном Северского Донца, в целом донные отложения рек бассейна Тузлова характеризуются большими содержаниями пирита и меньшими – гидроокислов железа и магнетита, содержания ильменита при этом практически равны. Наибольшее содержание магнетита среди речных осадков бассейна Тузлова отмечено в 31 створе реки Атюхта, а наибольшие значения гидроокислов железа – в створе 23 и 22 реки Большой Несветай. Содержание пирита в осадках двух бассейнов редко превышает 10 %, однако в створе 40 реки Тузлов это значение составляет 52,5 %, за счет чего среднее значение по бассейну получается выше практически в два раза (по сравнению с бассейном Северского Донца).

Обратимся теперь к особенностям распределения минералов тяжелой фракции в зависимости от категории реки, чтобы выявить степень влияния природных факторов на содержание того или иного минерала в речных осадках. На рисунке 7 представлен график распределения содержаний основных минералов тяжелой фракции – ильменита, магнетита, гидроокислов железа и пирита – в тяжелой фракции донных отложений по категориям рек. Как видно из данного графика, в осадках малых рек наблюдаются наибольшие содержания как магнетита, так и гидроокислов железа.

С учетом того, что самое большое значение для пирита в донных осадках характерно для створа 40 реки Тузлов, относящихся к категории средних рек, очевидно, что формирование пирита не так сильно зависит от физико-географических или гранулометрических условий – большую роль будут играть особые условия, установившиеся в конкретном створе.

Таблица 11 – Основные минералы тяжелой фракции донных отложений рек бассейна Тузлова (составлено автором)

Река	№ створа	Выход тяжелой фракции, %	Терригенные минералы, % тяжелой фракции						Аутигенные минералы, % тяжелой фракции		
			Циркон	Ильменит	Кианит	Ставролит	Турмалин	Гранат	Магнетит, гематит	Гидроокислы железа	Пирит, марказит
Бол. Несветай	21	0,3	9,0	43,8	5,0	4,4	1,9	6,3	12,1	0,2	ед
	22	0,2	0,7	13,4	0,2	2,0	0,7	2,7	33,0	43,6	ед
	23	0,6	8,6	18,0	3,6	4,1	2,5	0,2	0,1	55,8	ед
Мал. Несветай	24	0,1	2,0	80,0	2,0	3,0	0,2	2,0	0,1	3,0	1,0
	25	0,3	13,0	54,0	1,5	2,3	1,5	3,8	12,5	2,3	2,0
	26	0,6	4,6	5,3	1,4	1,6	1,1	1,1	35,0	21,7	0,8
Аюта	27	0,2	6,5	34,8	2,8	1,7	1,1	2,9	29,0	5,7	ред
	28	0,2	9,7	44,7	2,4	2,6	2,6	3,4	0,2	15,5	1,7
	29	0,1	0,2	24,8	0,2	2,7	2,0	4,7	33,0	22,1	ред
Атюхта	30	0,3	4,2	22,2	1,2	1,8	1,2	2,4	16,5	24,0	4,0
	31	2,1	1,2	13,3	0,5	1,1	0,7	0,7	60,1	18,6	ред
Грушевка	32	0,2	5,4	48,2	6,1	4,0	1,3	3,3	10,2	2,0	ред
	33	0,3	9,0	45,0	9,3	3,1	2,5	3,1	8,1	1,9	ред
	34	0,2	4,5	49,7	3,2	3,6	2,2	3,6	8,4	2,9	2,3
	35	0,3	4,5	42,5	3,0	3,1	1,9	3,1	24,5	5,0	0,8
Кадамовка	36	0,3	4,8	53,2	4,0	3,8	1,5	4,5	1,3	1,5	ред
	37	0,3	4,3	47,6	3,7	4,0	1,3	3,4	15,4	2,7	ред
	38	0,2	6,8	32,0	5,4	2,0	1,0	2,0	21,5	6,0	1,8
Тузлов	39	0,2	5,2	38,8	2,8	3,4	1,1	2,9	13,1	5,7	1,6
	40	0,1	0,2	11,3	0,2	2,3	0,2	2,3	5,0	3,0	52,5
Среднее по бассейну		0,4	5,2	36,1	2,9	2,8	1,4	2,9	17,0	12,1	4,0

Содержание ильменита, ожидаемо, возрастает от малых рек к большим. Тем самым для этого минерала большую роль в распределении играют природные факторы.

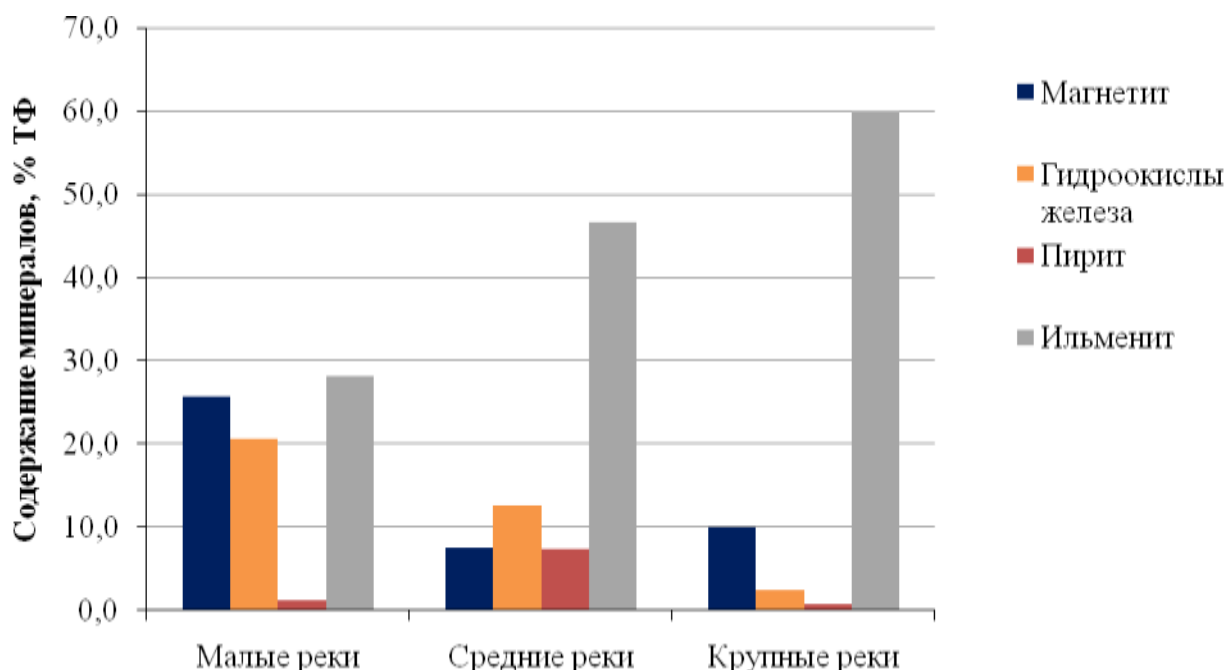


Рисунок 7 – Содержание основных минералов тяжелой фракции (ТФ) донных отложений в зависимости от категории реки (составлено автором)

В распределении содержаний минералов тяжелой фракции относительно пробы в целом также можно выявить некоторые особенности, которые будут связаны не только с соотношениями различных минералов железа, но и зависеть от выхода самой тяжелой фракции. Так, на рисунке 8 представлено распределение содержаний магнетита в речных осадках Восточного Донбасса. На картосхеме отчетливо выделяются три наиболее ярких участка – створы 14 реки Большая Гнилуша, створ 31 реки Атюхта и створ 1 реки Большая Каменка. Эти створы характеризуются как и высокой долей магнетита в тяжелой фракции (90 % – 60 % – 54% тяжелой фракции, соответственно), так и повышенным выходом тяжелой фракции (2,1 % – 2,1 % – 1,2 %, соответственно).

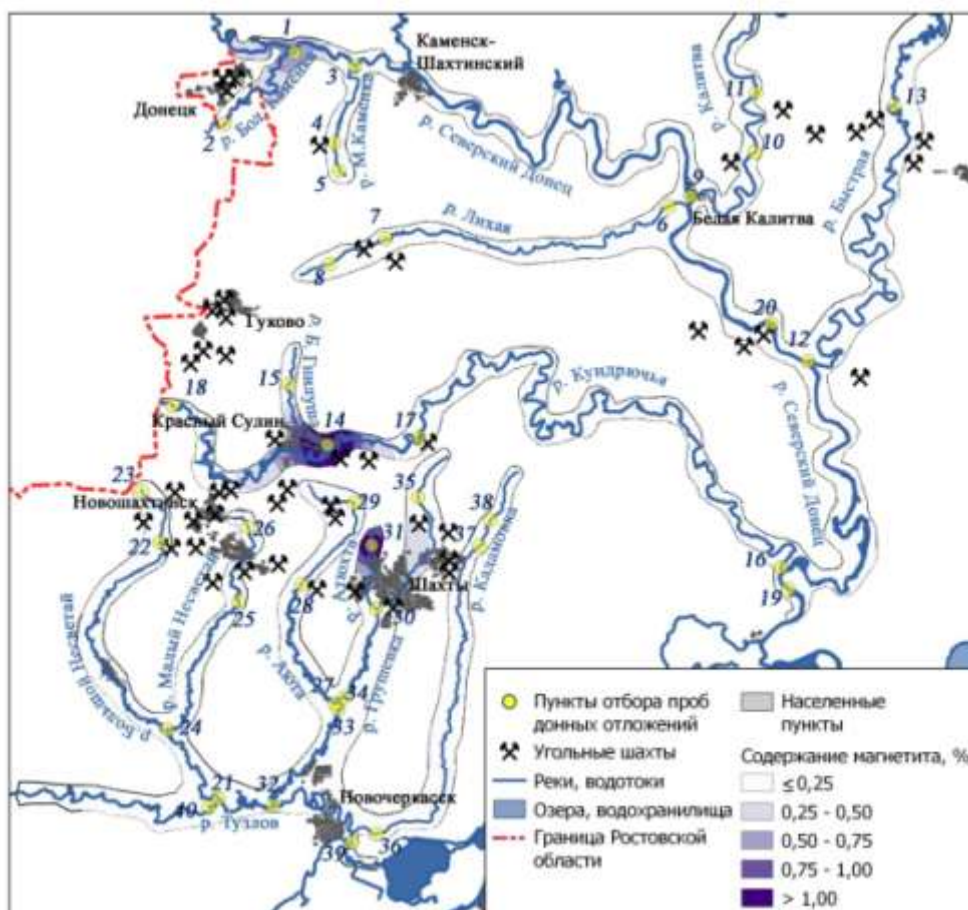


Рисунок 8 – Распределение содержания магнетита в речных осадках Восточного Донбасса, % (составлено автором)

На рисунке 9 представлена картосхема распределения пирита в донных отложениях рек Восточного Донбасса (в %). На данной картосхеме наблюдаются два створа с максимальными содержаниями минерала – 8 реки Лихая и 40 реки Тузлов. Эти створы характеризуются повышенными содержаниями пирита в тяжелой фракции, но одновременно низкими значениями её выхода. В большей степени образование пирита в донных осадках связано не с наличием железа, а с присутствием сульфатной серы. Как указано в работе [38], для створа реки Тузлов с максимальным по району исследований содержанию пирита в отложениях характерен экстремальный уровень загрязнения воды по УКИЗВ (7,05) и одна из самых высоких концентраций сульфат-ионов в воде (2208 мг/дм<sup>3</sup>) в пределах Восточного Донбасса.

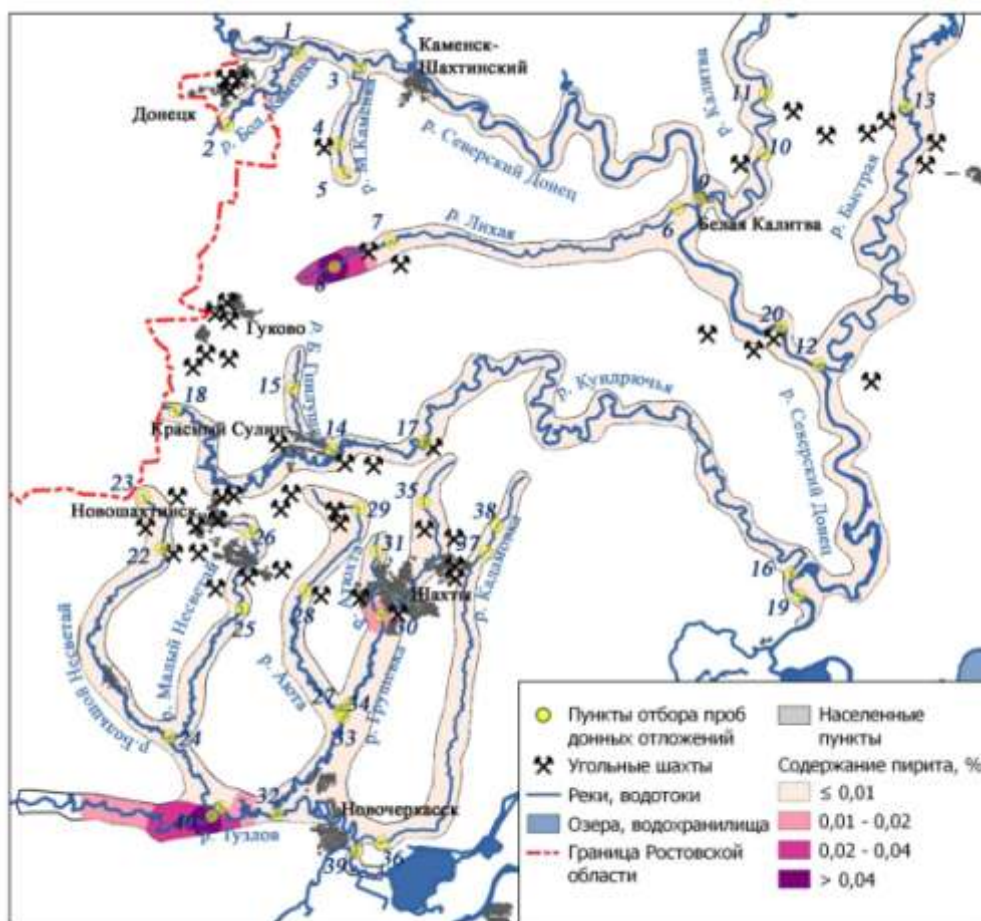


Рисунок 9 – Распределение содержания пирита в речных осадках Восточного Донбасса, % (составлено автором)

Источником для образования в донных осадках аутигенных минералов железа являются гидроокислы железа, которые поступают в больших количествах с техногенными шахтными водами [38]. На рисунке 10 представлена картосхема распределения содержания гидроокислов железа в речных осадках Восточного Донбасса. Если значимые содержания магнетита и пирита обнаружены только в тяжелой фракции, то гидроокислы железа присутствуют как в пелитовой, так и песчано-алевритовой фракции. Для построения данной картосхемы использована сумма содержаний во всех фракциях.

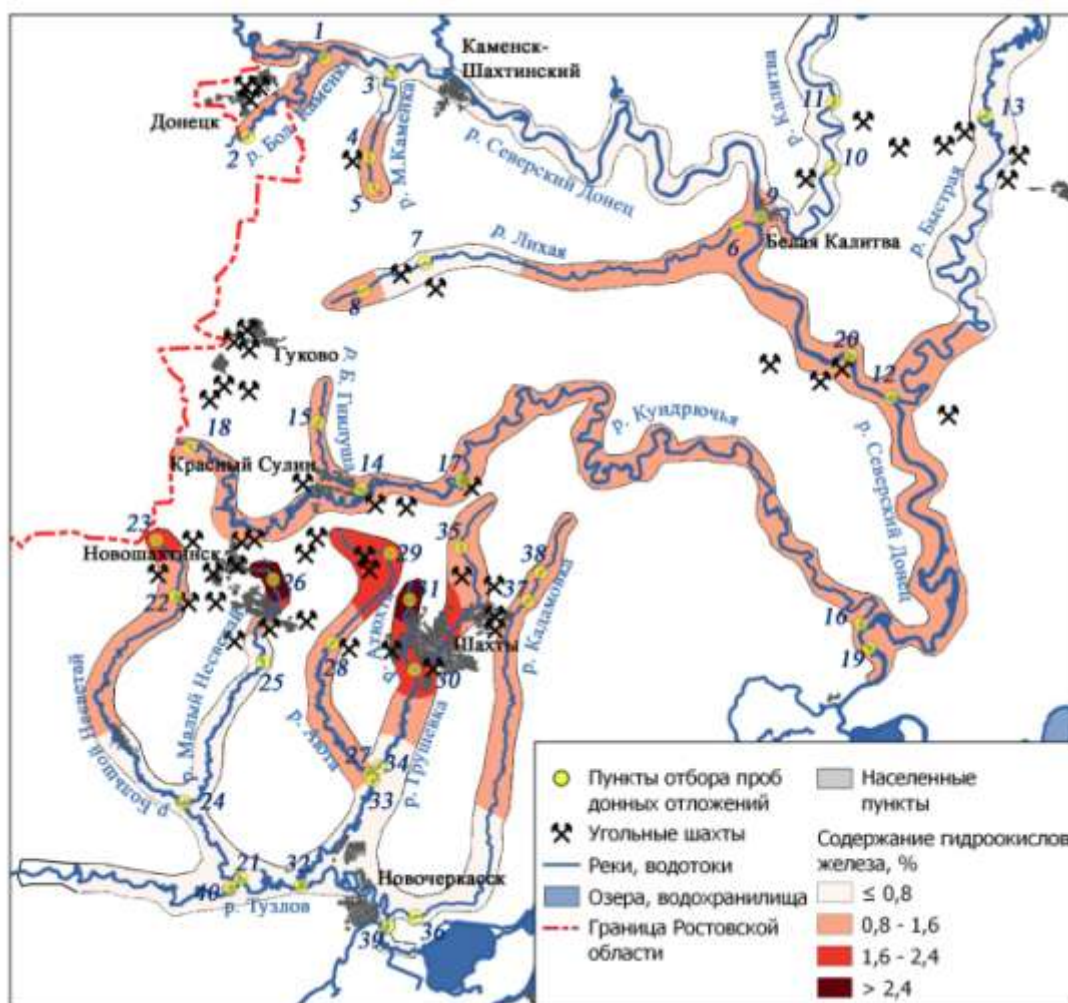


Рисунок 10 – Распределение содержания гидроокислов железа в речных осадках Восточного Донбасса, % (составлено автором)

Обращает на себя внимание то, что концентрация гидроокислов железа в целом выше, чем других аутигенных минералов. На картосхеме отчетливо выделяется область с наибольшими содержаниями: верховья рек Большой, Малый Несветай, Аюта, Атюхта и Грушевка, совпадающая с районом размещения наибольшего числа предприятий угледобывающей промышленности и городов Шахты и Новошахтинск. Тем самым, повышенные содержания гидроокислов железа в осадках подчеркивают степень воздействия техногенных шахтных вод на донные отложения рек Восточного Донбасса.

Таким образом, минеральный состав легкой фракции четко зависит от категории и водности реки: чем крупнее река, чем выше водность, тем ниже в её

донных осадках содержания пелитовой фракции и её основных компонентов. Малые реки, как правило, характеризуются более высокими содержаниями глинистых минералов и органического вещества. Вместе с тем, дифференциация минерального состава легкой фракции донных осадков в лучшей степени выражена в бассейне Северского Донца, исследуемые реки которого представляют три основные категории.

Основными минералами тяжелой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса 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. При этом содержания последнего в большей степени связаны с наличием сульфатной серы.

## 4 ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

### 4.1 Петрохимическая характеристика донных отложений рек

Содержание основных породообразующих оксидов в осадках во многом отражает особенности их формирования. Как указывает Е.П. Янин [125], в природных условиях петрохимический состав является достаточно однородным в пространственном отношении, как правило, характеризуется высокими содержаниями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При этом техногенные илы по своему составу будут резко отличаться от фонового аллювия, что вызвано особенностями поступающего с преобразованных территорий материала и спецификой условий среды техногенного осадконакопления.

Химический состав донных отложений рек Восточного Донбасса представлен в таблице 12. По содержаниям основных породообразующих оксидов донные осадки исследуемых рек значительно различаются: доля  $\text{SiO}_2$  изменяется от 44 до 95 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – от 3,9 до 14,3 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – от 0,4 до 11,4 % и т.д. Стоит отметить, что во многом распределение основных оксидов связано с водностью рек (крупностью): в бассейне Северского Донца дифференциация осадков рек по составу выражена сильнее, чем в бассейне Тузлова, где все реки, кроме Тузлова, относятся к категории малых рек. Величину потерь при прокаливании (ППП) обычно используют в качестве косвенного показателя содержания органического материала в осадках, и поэтому ее можно применять при оценке содержания органического углерода в донных отложениях [24, 134]. Как видно из таблицы 12, в большинстве створов доля ППП составляет выше 10 %, и, как правило, высокие значения показателя отмечены в отложениях малых рек.

Таблица 12 – Химический состав донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Река	Створ	Содержание компонента, %												
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	ППП	Сумма
Бассейн Северского Донца														
Большая Каменка	1	59,7	14,2	5,4	3,8	1,4	0,5	0,7	2,0	1,0	0,3	0,1	11,6	100,7
Малая Каменка	3	82,5	4,6	1,9	3,2	0,4	0,6	0,4	1,0	0,4	0,1	0,0	4,9	100,0
	4	56,6	13,2	5,3	5,4	1,5	0,8	0,7	2,1	1,0	0,2	0,1	13,7	100,6
	5	65,5	9,4	4,1	5,0	1,0	0,4	0,5	1,5	0,8	0,2	0,1	12,1	100,6
Лихая	6	53,0	8,9	3,8	13,4	1,3	1,7	0,5	1,5	0,7	0,2	0,1	15,4	100,5
	7	46,6	15,9	2,5	7,7	2,2	2,9	0,7	2,1	0,7	0,2	0,3	18,0	99,8
	8	59,8	11,6	4,8	6,0	1,5	0,9	0,7	1,8	1,0	0,3	0,1	12,0	100,5
Калитва	9	84,6	3,9	1,4	3,5	0,4	0,1	0,3	0,8	0,3	0,1	0,0	5,1	100,5
	10	95,1	1,1	0,7	1,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	1,2	100,3
	11	92,6	2,0	0,8	1,7	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,0	0,0	1,9	99,9
Быстрая	12	71,4	6,2	2,1	1,1	0,4	0,5	0,4	1,3	0,4	0,1	0,0	16,6	100,5
	13	91,5	1,9	0,9	2,4	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	2,7	100,3
Большая Гнилуша	14	44,2	11,0	11,4	6,7	1,7	2,6	0,6	1,7	0,9	0,3	0,6	18,9	100,6
	15	58,9	11,0	4,1	7,2	1,5	0,6	0,7	1,8	1,1	0,2	0,2	12,6	99,9
Кундрючья	16	65,4	11,0	4,2	5,1	1,6	0,8	0,6	1,7	0,8	0,1	0,1	8,8	100,2
	17	55,0	14,7	5,6	6,5	1,4	1,5	0,7	2,1	0,9	0,2	0,1	11,5	100,2
Северский Донец	19	95,2	0,8	0,4	2,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	1,4	100,7
	20	80,2	4,3	1,5	5,0	0,3	0,4	0,4	0,8	0,4	0,1	0,0	6,6	100,0
Бассейн Тузлова														
Большой Несветай	21	72,8	6,0	3,3	4,4	1,0	1,5	0,5	1,3	0,6	0,1	0,1	8,8	100,4
	22	54,7	14,3	6,4	4,1	2,0	1,2	0,7	2,4	0,8	0,2	0,3	13,4	100,5
	23	69,2	13,8	6,1	0,6	1,3	0,4	0,7	2,0	0,7	0,1	0,1	5,5	100,5

Река	Створ	Содержание компонента, %												
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	ППП	Сумма
Малый Несветай	24	50,0	9,9	4,6	10,1	2,2	3,2	0,6	1,9	0,8	0,2	0,2	16,1	99,8
	25	64,8	9,8	4,3	4,8	1,6	1,9	0,7	2,0	0,9	0,2	0,2	8,8	100,0
	26	76,2	3,9	2,8	3,9	0,8	0,4	0,2	0,6	0,3	0,1	1,7	9,2	100,1
Аюта	27	61,7	8,9	4,6	5,9	1,7	2,1	0,6	1,6	0,8	0,2	0,3	12	100,4
	28	58,2	14,3	7,2	4,7	1,5	0,9	0,8	2,0	0,7	0,2	0,1	9,9	100,5
	29	55,8	11,1	5,3	4,8	1,7	1,6	0,7	1,9	0,8	0,2	0,2	16,2	100,3
Атюхта	30	51,5	9,7	5,1	4,2	1,3	1,2	0,5	1,6	0,6	0,3	0,2	23,9	100,1
	31	55,0	5,4	3,2	14,6	0,7	0,4	0,3	0,6	0,5	0,1	0,1	18,8	99,7
Грушевка	32	62,8	11,5	4,5	4,5	1,7	1,0	0,7	1,9	0,9	0,3	0,2	10,5	100,5
	33	62,4	8,5	3,7	6,5	1,3	1,1	0,6	4,1	0,7	0,3	0,1	11,1	100,4
	34	60,6	11,5	4,7	4,9	1,5	1,1	0,7	2,0	1,0	0,5	0,2	11,8	100,5
	35	59,3	10,9	3,9	6,9	1,5	0,7	0,7	2,0	1,1	0,3	0,1	13,1	100,5
Кадамовка	36	62,9	8,1	4,2	5,4	1,1	2,0	0,5	1,5	0,6	0,2	0,2	13,6	100,3
	37	64,4	10,9	4,4	5,4	1,7	0,2	0,7	1,6	0,8	0,1	0,1	9,7	100,0
	38	54,6	13,3	5,2	6,1	2,1	1,0	0,7	1,9	0,9	0,2	0,1	14,3	100,4
Тузлов	39	55,3	8,1	4,0	10,5	1,4	1,6	0,5	1,3	0,6	0,3	0,1	16,7	100,4
	40	51,0	14,0	5,8	7,4	2,1	2,0	0,7	2,1	0,8	0,3	0,1	14,2	100,5

Техногенные шахтные воды оказывают влияние не только на компонентный состав глинистого вещества, но и на химический состав осадка в целом. В створах, расположенных ниже выхода шахтных вод, в среднем, отмечается снижение содержания  $\text{SiO}_2$  (-5,8 %),  $\text{CaO}$  (-0,5 %) по сравнению с верхними створами. При этом содержания многих компонентов возрастают:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (+2,0 %), ППП (+1,2 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (+1,1 %).

В отдельных створах рек прирост содержаний основных оксидов будет более контрастным. Так, например, в нижнем створе реки Большая Гнилуша содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  возрастает на 7,3 % по сравнению с верхним створом, а доля  $\text{SiO}_2$  снижается практически на 15 %. В нижнем створе реки Лихая снижается и содержание  $\text{SiO}_2$ , и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , однако содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  возрастает на 4,4 %.

В целом подобное распределение указывает на то, что на содержание основных породообразующих оксидов оказывают влияние не только гидродинамические факторы, способствующие накоплению песчаных фракций в осадках крупных и средних рек и тонкодисперсных илов в осадках малых рек. Различия в содержании основных компонентов осадков нижних и верхних створов малых рек (Большая Гнилуша, Малая Каменка, Большой и Малый Несветай) наводит на мысль, что и техногенные факторы оказывают влияние на подобное распределение.

На основе данных о химическом составе донных осадков из таблицы 12 проведено детальное определение минерального состава глинистого вещества с помощью метода треугольных диаграмм, разработанного В.Е. Закруткиным [29]. Сначала для уточнения структурной группы донных отложений (алевропсаммитовая или пелитовая) была использована диаграмма А – К (рисунок 11), где параметр А представляет собой соотношение  $(\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ , а параметр К –  $(\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}) / \text{Na}_2\text{O}$ .

Как видно из рисунка 11, фигуративные точки состава донных осадков распределены неравномерно. Отложения рек Северского Донца, Калитвы, Быстрой соответствуют по составу псаммитам, а именно аркозам и граувакковым

аркозам, существенно кварцевым песчаникам. Фигуративные точки осадков малых и средних рек попадают преимущественно в поле глин.

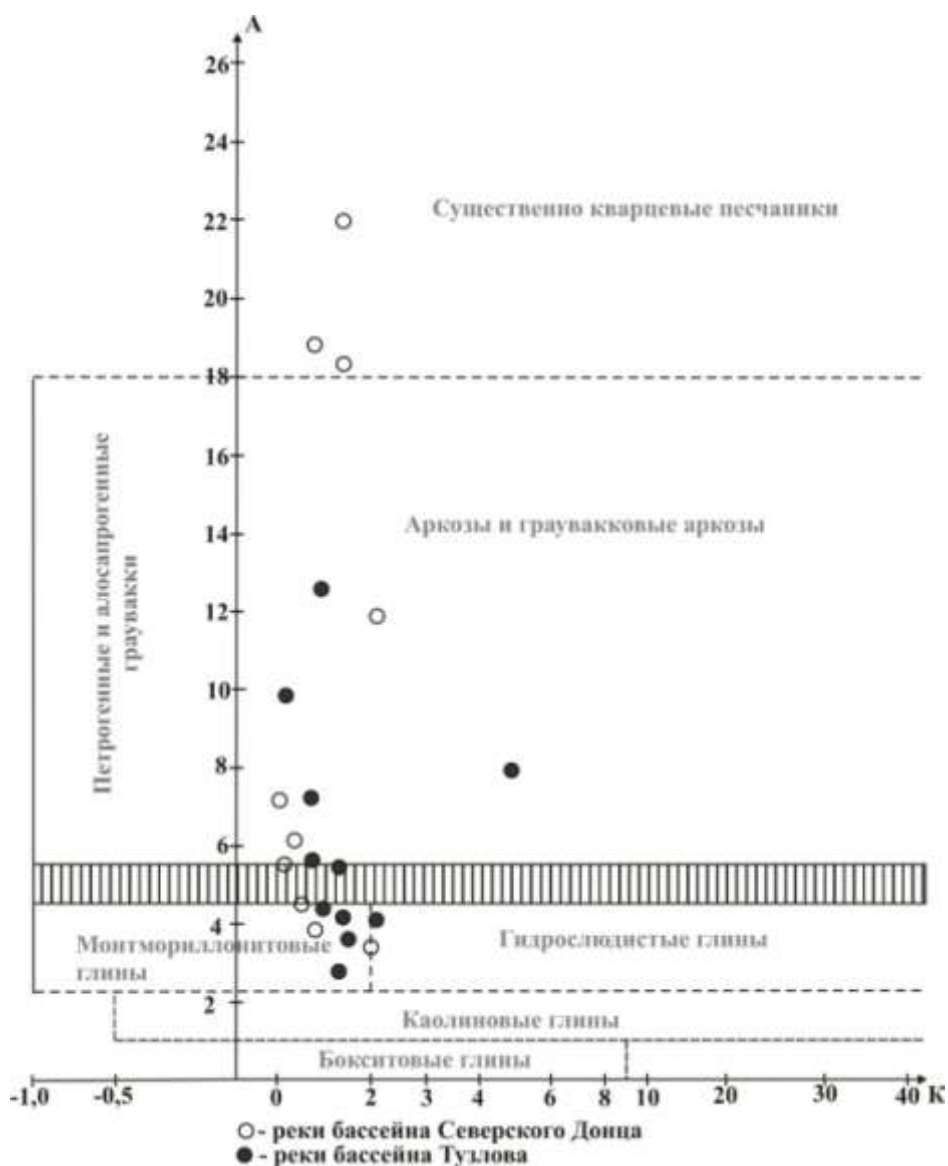


Рисунок 11 – Положение фигуративных точек для донных отложений рек бассейна Северского Донца на диаграмме А – К для определения соответствия их состава к определенному типу осадочных пород (составлено автором по [29])

Уточнение минерального состава глинистых осадков производилось с помощью треугольных диаграмм (рисунок 12) для точек, находящихся либо в области глин (монтмориллонитовых, каолинитовых, гидрослюдистых или бокситовых), либо рядом с ней (зона неопределенности). В углах трехстороннего треугольника сгруппированы основные породообразующие оксиды:  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,

MgO. Внутри этого пространства помещен треугольник с секциями, ограничивающими основные типы химических составов глин, которые также позволяют оценить примерный состав того или иного глинистого компонента. Результаты построения приведены в таблице 13. Как видно из неё, главным компонентом глин является гидрослюда, причем со значительной примесью монтмориллонита либо каолинита.

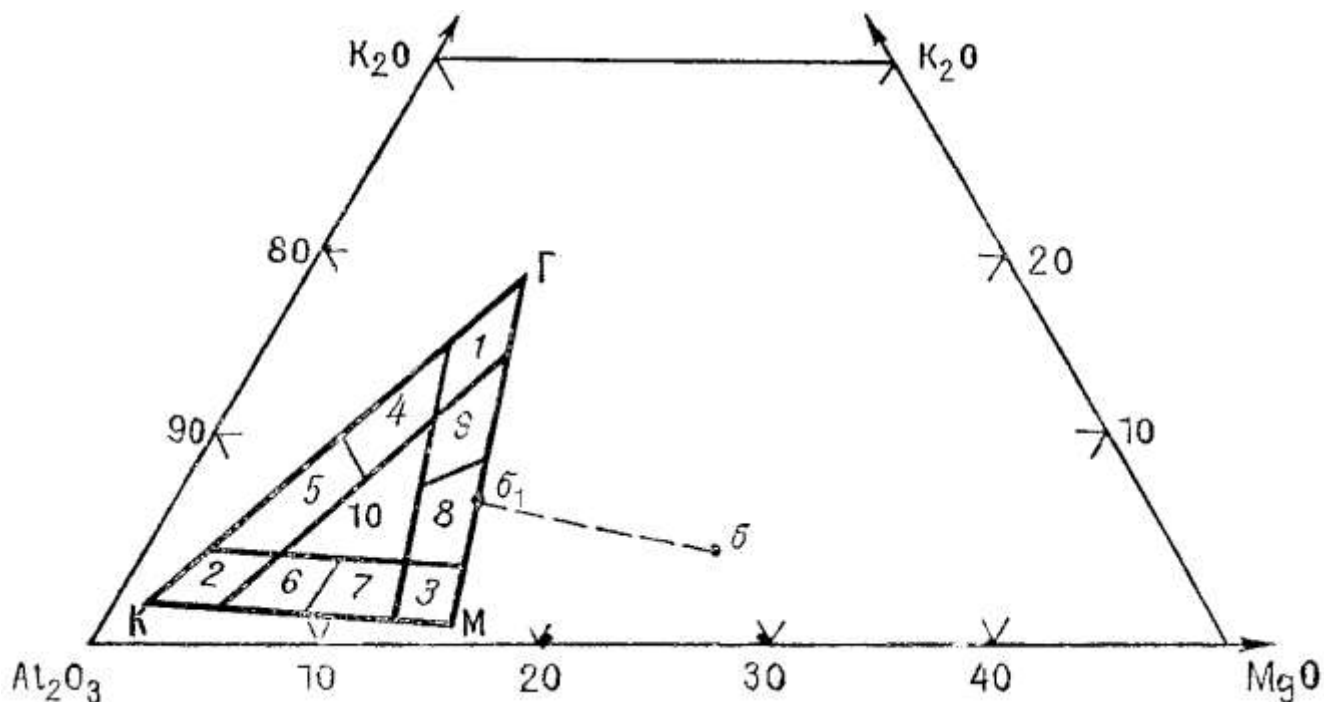


Рисунок 12 – Диаграмма для определения исходного минерального состава метапелитов [29]

Таблица 13 – Характеристика компонентного состава глинистого вещества донных отложений рек Восточного Донбасса (составлена автором)

Створ	Река	Номер секции на диаграмме	Тип глины
1	Большая Каменка	4	Каолинит-гидрослюдистый
4	Малая Каменка	4	Каолинит-гидрослюдистый
5	Малая Каменка	4	Каолинит-гидрослюдистый
6	Лихая	9	Монтмориллонит-гидрослюдистый
7	Лихая	9	Монтмориллонит-гидрослюдистый

Створ	Река	Номер секции на диаграмме	Тип глины
8	Лихая	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
14	Большая Гнилуша	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
15	Большая Гнилуша	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
16	Кундрючья	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
17	Кундрючья	4	Каолинит-гидроslюдистый
22	Большой Несветай	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
23	Большой Несветай	4	Каолинит-гидроslюдистый
28	Аюта	4	Каолинит-гидроslюдистый
29	Аюта	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
38	Кадамовка	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
39	Тузлов	9	Монтмориллонит-гидроslюдистый
40	Тузлов	1	Гидроslюдистый

Таким образом, основными компонентами донных отложений рек Восточного Донбасса являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , также до 20% осадка приходится на ППП, являющиеся показателем содержания органического вещества в осадке. Крупные реки от малых заметно отличаются по содержанию основных породообразующих оксидов, прежде всего,  $\text{SiO}_2$ .

На основе данных о содержании основных породообразующих оксидов в осадках рек Восточного Донбасса произведено определение детального состава глинистого вещества, главным компонентом которого во всех створах является гидроslюда, причем со значительной примесью монтмориллонита либо каолинита.

В створах, расположенных ниже выхода техногенных шахтных вод, отмечается снижение содержания  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$  в речных осадках, одновременно с этим увеличивается доля  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и ППП.

## 4.2 Распределение тяжелых металлов в донных отложениях рек

С учетом специфики воздействия шахтных вод на пресноводные экосистемы Восточного Донбасса приоритетными загрязняющими веществами будут тяжелые металлы и их соединения. Как показывают исследования, содержание и состав тяжелых металлов в донных отложениях довольно четко отражают специфику источников загрязнения водного объекта [123].

Для изучения элементного состава и содержания тяжелых металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса использованы данные по различным створам на 8 реках в бассейне Северского Донца и 7 реках в бассейне Тузлова.

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. Химический состав валовых проб донных отложений рек бассейна Северского Донца и Тузлова представлен в таблице 14 и 15.

Как известно, донные отложения рек вообще характеризуются различным гранулометрическим составом. Так, в пределах исследуемого района выделяются реки преимущественно песчаного (река Быстрая – 91,8% выход песчано-алевритовой фракции) и преимущественно глинистого (река Большая Гнилуша – 87,8% выход пелитовой фракции) составов [18]. Поэтому чтобы охарактеризовать химический состав донных отложений рек Восточного Донбасса, проведен анализ распределения микроэлементов в специально выделенной пелитовой фракции донных отложений малых и средних рек Восточного Донбасса. Концентрации элементов в пелитовой фракции донных отложений рек двух исследуемых бассейнов представлены в таблицах 14 и 15.

Таблица 14 – Химический состав донных отложений рек бассейна Северского Донца (составлено автором)

Река	Номер створа	Концентрации элементов, мг/кг							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Большая Каменка	1	<u>25800,0*</u>	<u>18,4</u>	<u>840,0</u>	<u>48,5</u>	<u>57,9</u>	<u>50,9</u>	<u>128,5</u>	<u>104,0</u>
		40300,0	15,2	736,0	34,6	62,1	22,3	97,8	150,0
Большая Каменка	2	<u>23100,0</u>	<u>25,4</u>	<u>1410,0</u>	<u>44,9</u>	<u>80,3</u>	<u>46,1</u>	<u>126,6</u>	<u>76,1</u>
		44300,0	25,6	1190,0	36,3	62,2	41,5	106,5	98,9
Малая Каменка	3	<u>21100,0</u>	<u>19,6</u>	<u>600,0</u>	<u>45,5</u>	<u>54,7</u>	<u>35,6</u>	<u>167,7</u>	<u>93,7</u>
		17200,0	5,3	299,0	13,9	31,6	5,6	68,8	400,0
Малая Каменка	4	<u>18200,0</u>	<u>16,2</u>	<u>750,0</u>	<u>34,2</u>	<u>65,7</u>	<u>45,7</u>	<u>94,6</u>	<u>64,5</u>
		37600,0	13,9	667,0	29,8	55,0	18,2	103,8	100,0
Малая Каменка	5	<u>22100,0</u>	<u>18,6</u>	<u>740,0</u>	<u>37,0</u>	<u>50,2</u>	<u>48,4</u>	<u>120,5</u>	<u>91,4</u>
		30600,0	10,2	404,0	24,3	52,3	15,8	255,2	600,0
Лихая	6	<u>14600,0</u>	<u>13,9</u>	<u>770,0</u>	<u>26,5</u>	<u>46,9</u>	<u>22,3</u>	<u>72,1</u>	<u>56,3</u>
		27200,0	9,5	644,0	20,1	43,6	10,8	70,6	150,0
Лихая	7	–	<u>50,0</u>	<u>2000,0</u>	<u>80,0</u>	<u>150,0</u>	<u>10,0</u>	<u>100,0</u>	<u>100,0</u>
		43600,0	30,3	2536,0	44,9	96,3	23,0	228,8	80,0
Лихая	8	<u>26600,0</u>	<u>42,0</u>	<u>2670,0</u>	<u>80,5</u>	<u>87,8</u>	<u>56,9</u>	<u>237,6</u>	<u>106,4</u>
		40300,0	52,9	1498,0	90,7	127,1	19,7	254,5	100,0
Калитва	9	<u>14100,0</u>	<u>10,1</u>	<u>310,0</u>	<u>24,7</u>	<u>29,7</u>	<u>34,1</u>	<u>65,0</u>	<u>59,2</u>
		17000,0	4,2	228,0	19,7	41,2	6,9	280,6	100,0
Калитва	10	<u>9300,0</u>	<u>10,8</u>	<u>260,0</u>	<u>26,4</u>	<u>28,1</u>	<u>10,1</u>	<u>64,9</u>	<u>40,2</u>
		6200,0	2,5	86,0	4,3	11,0	1,0	11,8	150,0
Калитва	11	<u>13200,0</u>	<u>10,2</u>	<u>560,0</u>	<u>21,5</u>	<u>44,3</u>	<u>29,6</u>	<u>54,3</u>	<u>63,0</u>
		5900	2,8	96	3,8	11,7	1,3	18,3	30
Быстрая	12	<u>14400,0</u>	<u>11,0</u>	<u>370,0</u>	<u>31,1</u>	<u>26,2</u>	<u>21,4</u>	<u>58,5</u>	<u>65,0</u>
		16700,0	5,6	174,0	14,8	28,4	6,3	35,1	400,0
Быстрая	13	<u>21400,0</u>	<u>17,3</u>	<u>780,0</u>	<u>35,6</u>	<u>45,5</u>	<u>37,1</u>	<u>107,9</u>	<u>85,8</u>
		8900,0	1,9	171,0	6,5	14,0	1,7	15,0	20,0
Большая Гнилуша	14	–	<u>50,0</u>	<u>4000,0</u>	<u>100,0</u>	<u>300,0</u>	<u>20,0</u>	<u>300,0</u>	<u>150,0</u>
		83300,0	35,8	4436,0	100,6	120,4	34,7	219,3	800,0
Большая Гнилуша	15	<u>19900,0</u>	<u>23,0</u>	<u>1380,0</u>	<u>36,8</u>	<u>54,2</u>	<u>42,3</u>	<u>109,5</u>	<u>82,3</u>
		32100,0	15,4	1128,0	29,0	59,7	12,2	111,0	300,0
Кундрючья	16	<u>21800,0</u>	<u>17,9</u>	<u>1010,0</u>	<u>37,6</u>	<u>59,7</u>	<u>38,6</u>	<u>117,1</u>	<u>87,1</u>
		33800,0	10,2	716,0	25,3	58,4	9,7	59,9	200,0
Кундрючья	17	–	<u>30,0</u>	<u>700,0</u>	<u>60,0</u>	<u>200,0</u>	<u>15,0</u>	<u>100,0</u>	<u>80,0</u>
		41300,0	17,1	1044,0	33,4	62,5	16,0	96,4	200,0
Кундрючья	18	<u>20500,0</u>	<u>26,2</u>	<u>1240,0</u>	<u>38,6</u>	<u>74,6</u>	<u>38,9</u>	<u>128,2</u>	<u>87,6</u>
		38500,0	27,8	1065,0	32,1	63,8	36,2	123,9	100,3
Северский Донец	19	<u>5500,0</u>	<u>5,0</u>	<u>260,0</u>	<u>15,1</u>	<u>12,5</u>	<u>17,5</u>	<u>42,0</u>	<u>36,1</u>
		4700,0	1,7	110,0	5,7	9,0	3,1	28,0	60,0

Река	Номер створа	Концентрации элементов, мг/кг							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Северский Донец	20	<u>8400,0</u>	<u>8,2</u>	<u>170,0</u>	<u>19,8</u>	<u>25,2</u>	<u>24,0</u>	<u>126,8</u>	<u>47,0</u>
		12100,0	5,0	133,0	10,8	19,4	6,7	90,2	50,0

Примечание: \* - в числителе - концентрации элементов в пелитовой фракции, в знаменателе - в валовой пробе.

Таблица 15 – Химический состав донных отложений рек бассейна Тузлова (составлено автором)

Река	Номер створа	Концентрации элементов, мг/кг							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Большой Несветай	21	<u>14800,0*</u>	<u>13,7</u>	<u>700,0</u>	<u>27,0</u>	<u>33,0</u>	<u>39,3</u>	<u>69,7</u>	<u>25,7</u>
		23700,0	7,8	481,0	18,8	40,1	8,6	47,5	200,0
Большой Несветай	22	<u>35667,9</u>	<u>15,3</u>	<u>3399,0</u>	<u>37,4</u>	<u>57,4</u>	<u>30,0</u>	<u>105,5</u>	<u>161,2</u>
		44400,0	18,1	1962,0	37,9	73,7	18,7	125,2	80,0
Большой Несветай	23	<u>32531,2</u>	<u>11,4</u>	<u>959,0</u>	<u>29,5</u>	<u>41,5</u>	<u>16,5</u>	<u>74,9</u>	<u>224,6</u>
		42400,0	15,8	476,0	28,4	64,0	16,7	76,8	150,0
Малый Несветай	24	<u>19700,0</u>	<u>20,9</u>	<u>1970,0</u>	<u>31,8</u>	<u>67,0</u>	<u>28,4</u>	<u>106,1</u>	<u>91,1</u>
		32900,0	14,4	1435,0	27,6	68,6	10,5	76,8	100,0
Малый Несветай	25	<u>28294,7</u>	<u>17,2</u>	<u>1118,1</u>	<u>28,8</u>	<u>52,1</u>	<u>17,1</u>	<u>83,4</u>	<u>233,0</u>
		30100,0	13,4	1450,0	40,7	61,0	11,8	95,9	150,0
Малый Несветай	26	<u>31899,2</u>	<u>28,0</u>	<u>1980,5</u>	<u>37,5</u>	<u>116,0</u>	<u>26,0</u>	<u>150,2</u>	<u>535,5</u>
		16700,0	106,8	1408,3	17,7	272,7	7,1	234,6	30,0
Аюта	27	<u>25964,3</u>	<u>11,0</u>	<u>456,7</u>	<u>40,2</u>	<u>50,0</u>	<u>28,3</u>	<u>134,4</u>	<u>496,0</u>
		31000,0	14,5	2318,0	22,4	55,0	12,1	106,2	100,0
Аюта	28	<u>36883,2</u>	<u>13,3</u>	<u>646,2</u>	<u>32,9</u>	<u>51,6</u>	<u>26,9</u>	<u>80,6</u>	<u>172,8</u>
		50100,0	18,9	710,0	32,6	75,5	17,2	97,9	100,0
Аюта	29	<u>36509,8</u>	<u>13,6</u>	<u>594,5</u>	<u>55,4</u>	<u>55,6</u>	<u>107,1</u>	<u>143,2</u>	<u>406,6</u>
		36300,0	14,4	1387,0	47,3	60,2	18,5	104,3	150,0
Атюхта	30	<u>31940,2</u>	<u>12,8</u>	<u>413,7</u>	<u>60,8</u>	<u>61,5</u>	<u>33,5</u>	<u>122,7</u>	<u>402,9</u>
		34300,0	43,0	1736,0	70,1	127,8	34,9	237,2	400,0
Атюхта	31	<u>37292,6</u>	<u>13,5</u>	<u>516,8</u>	<u>55,4</u>	<u>59,0</u>	<u>45,9</u>	<u>182,7</u>	<u>137,3</u>
		26600,0	6,6	448,0	44,0	28,0	34,6	62,9	200,0
Грушевка	32	<u>36491,8</u>	<u>15,6</u>	<u>2460,9</u>	<u>42,4</u>	<u>68,3</u>	<u>29,1</u>	<u>127,0</u>	<u>495,9</u>
		32400,0	17,6	1552,0	29,9	66,9	13,8	92,2	100,0
Грушевка	33	<u>33233,8</u>	<u>17,6</u>	<u>1974,9</u>	<u>47,5</u>	<u>79,7</u>	<u>31,2</u>	<u>139,5</u>	<u>841,2</u>
		28700,0	12,7	926,0	37,3	54,7	14,5	320,3	100,0
Грушевка	34	<u>-</u>	<u>20,0</u>	<u>2000,0</u>	<u>150,0</u>	<u>60,0</u>	<u>15,0</u>	<u>150,0</u>	<u>150,0</u>
		33000,0	17,7	2022,0	38,1	66,9	19,6	148,7	150,0
Грушевка	35	<u>39185,6</u>	<u>14,8</u>	<u>568,0</u>	<u>49,7</u>	<u>61,4</u>	<u>32,3</u>	<u>151,4</u>	<u>187,7</u>
		28400,0	11,5	711,0	28,6	46,0	59,1	65,8	200,0

Река	Номер створа	Концентрации элементов, мг/кг							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Кадамовка	36	<u>31203,0</u>	<u>11,6</u>	<u>474,4</u>	<u>30,2</u>	<u>44,4</u>	<u>18,9</u>	<u>75,0</u>	<u>126,9</u>
		32600,0	13,2	1949,0	35,3	58,6	18,1	127,4	400,0
Кадамовка	37	<u>35591,3</u>	<u>14,8</u>	<u>630,2</u>	<u>37,2</u>	<u>58,9</u>	<u>35,8</u>	<u>84,7</u>	<u>118,0</u>
		30400,0	12,6	192,0	24,2	51,3	13,6	113,5	200,0
Кадамовка	38	<u>15379,5</u>	<u>7,4</u>	<u>634,9</u>	<u>16,5</u>	<u>21,7</u>	<u>9,0</u>	<u>42,9</u>	<u>113,5</u>
		38100,0	12,7	601,0	33,0	59,3	20,3	130,6	100,0
Тузлов	39	<u>-</u>	<u>20,0</u>	<u>800,0</u>	<u>200,0</u>	<u>50,0</u>	<u>15,0</u>	<u>100,0</u>	<u>100,0</u>
		27900,0	10,8	926,0	31,8	47,1	11,9	97,8	300,0
Тузлов	40	<u>-</u>	<u>20,0</u>	<u>600,0</u>	<u>150,0</u>	<u>60,0</u>	<u>20,0</u>	<u>300,0</u>	<u>100,0</u>
		42400,0	15,2	931,0	48,3	67,7	32,3	890,2	200,0

Примечание:\* - в числителе - концентрации элементов в пелитовой фракции, в знаменателе - в валовой пробе.

Другими словами, использование концентраций элементов в специально выделенной пелитовой фракции позволяет корректно сравнивать между собой степень загрязнённости гранулометрически неоднородных рек и их участков. Кроме того, использование пелитовой фракции более оправдано из-за её физико-химических особенностей. Содержание металлов в различных гранулометрических фракциях возрастает с уменьшением размера фракции, что обусловлено увеличением удельной площади поверхности частиц [81]. По этой причине пелитовая фракция будет наиболее точно и информативно отражать уровень загрязнения и распределение элементов в донных отложениях.

В донных отложениях определенных рек происходит трансформация химического состава в створах, расположенных ниже предполагаемого выхода шахтных вод. Данная закономерность прослеживается у створов рек Калитва (Co, Cu, Zn) и Малая Каменка (Mn, Ni) в бассейне Северского Донца и в створах рек Большой Несветай (Mn, Pb, Zn, Ni, Co, Fe, Cu), Кадамовка (Fe, Co, Cu, Cr, Zn, Pb, Ni), Грушевка (Co, Mn, Cr, Ni), Атюхта (Cu, Cr, Ni), Аюта (Fe, Mn) в бассейне Тузлова.

При этом стоит отметить, что как по фракциям, так и по бассейнам содержания элементов заметно варьируют. Так, для бассейна Северского Донца в пелитовой фракции донных отложений концентрации Co, Mn, Cu, Ni и Pb в

большинстве случаев заметно выше, чем в валовой пробе, что указывает на их накопление в данной фракции. В то же время для рек бассейна Тузлова концентрации большинства элементов в валовой пробе выше, чем в выделенной пелитовой фракции, за исключением Cr и Cu.

Оценку содержаний металлов в донных отложениях правильнее проводить исходя из их относительной распространенности, с этой целью были рассчитаны коэффициенты концентрации  $K_c$  для содержаний элементов в пелитовой фракции донных отложений и валовой пробе. Коэффициент концентрации ( $K_c$ ) химического элемента, характеризующий степень его концентрирования (уровень аномальности) в донных отложениях относительно фонового содержания, рассчитывался по формуле (1), однако вместо  $C_{фон}$  были использованы кларковые величины. Как известно, в районах, подверженных длительному техногенному воздействию, отбор фоновых проб либо затруднён, либо вовсе невозможен. Поэтому для определения коэффициентов концентрации металлов в пелитовой фракции и валовой пробе взяты кларки глин и глинистых сланцев и кларки осадочных пород по Н.А. Григорьеву [23], соответственно. Результаты расчетов для двух бассейнов представлены в таблицах 16 и 17.

Таблица 16 – Коэффициенты концентрации металлов в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (составлено автором)

Река	Номер створа	Коэффициенты концентрации							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Большая Каменка	1	<u>0,5*</u>	<u>1,0</u>	<u>1,1</u>	<u>1,0</u>	<u>1,6</u>	<u>3,6</u>	<u>1,4</u>	<u>0,9</u>
		1,1	1,1	1,0	1,1	1,7	1,9	1,4	2,0
Большая Каменка	2	<u>0,5</u>	<u>1,3</u>	<u>1,8</u>	<u>0,9</u>	<u>2,2</u>	<u>3,3</u>	<u>1,4</u>	<u>0,7</u>
		1,3	1,8	1,6	1,2	1,7	3,5	1,5	1,3
Малая Каменка	3	<u>0,4</u>	<u>1,0</u>	<u>0,8</u>	<u>0,9</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>1,9</u>	<u>0,9</u>
		0,5	0,4	0,4	0,4	0,9	0,5	1,0	5,2
Малая Каменка	4	<u>0,4</u>	<u>0,9</u>	<u>0,9</u>	<u>0,7</u>	<u>1,8</u>	<u>3,3</u>	<u>1,1</u>	<u>0,6</u>
		1,1	1,0	0,9	1,0	1,5	1,5	1,5	1,3
Малая Каменка	5	<u>0,5</u>	<u>1,0</u>	<u>0,9</u>	<u>0,8</u>	<u>1,4</u>	<u>3,5</u>	<u>1,4</u>	<u>0,8</u>
		0,9	0,7	0,6	0,8	1,4	1,3	3,7	7,8
Лихая	6	<u>0,3</u>	<u>0,7</u>	<u>1,0</u>	<u>0,5</u>	<u>1,3</u>	<u>1,6</u>	<u>0,8</u>	<u>0,5</u>
		0,8	0,7	0,9	0,6	1,2	0,9	1,0	2,0

Река	Номер створа	Коэффициенты концентрации							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Лихая	7	$\frac{-}{1,2}$	$\frac{2,6}{2,2}$	$\frac{2,5}{3,5}$	$\frac{1,6}{1,4}$	$\frac{4,2}{2,6}$	$\frac{0,7}{1,9}$	$\frac{1,1}{3,3}$	$\frac{0,9}{1,0}$
Лихая	8	$\frac{0,6}{1,1}$	$\frac{2,2}{3,8}$	$\frac{3,3}{2,1}$	$\frac{1,6}{2,9}$	$\frac{2,4}{3,4}$	$\frac{4,1}{1,6}$	$\frac{2,7}{3,7}$	$\frac{1,0}{1,3}$
Калитва	9	$\frac{0,3}{0,5}$	$\frac{0,5}{0,3}$	$\frac{0,4}{0,3}$	$\frac{0,5}{0,6}$	$\frac{0,8}{1,1}$	$\frac{2,4}{0,6}$	$\frac{0,7}{4,1}$	$\frac{0,5}{13,1}$
Калитва	10	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,6}{0,2}$	$\frac{0,3}{0,1}$	$\frac{0,5}{0,1}$	$\frac{0,8}{0,3}$	$\frac{0,7}{0,1}$	$\frac{0,7}{0,2}$	$\frac{0,4}{2,0}$
Калитва	11	$\frac{0,3}{0,2}$	$\frac{0,5}{0,2}$	$\frac{0,7}{0,1}$	$\frac{0,4}{0,1}$	$\frac{1,2}{0,3}$	$\frac{2,1}{0,1}$	$\frac{0,6}{0,3}$	$\frac{0,6}{0,4}$
Быстрая	12	$\frac{0,3}{0,5}$	$\frac{0,6}{0,4}$	$\frac{0,5}{0,2}$	$\frac{0,6}{0,5}$	$\frac{0,7}{0,8}$	$\frac{1,5}{0,5}$	$\frac{0,7}{0,5}$	$\frac{0,6}{5,2}$
Быстрая	13	$\frac{0,5}{0,3}$	$\frac{0,9}{0,1}$	$\frac{1,0}{0,2}$	$\frac{0,7}{0,2}$	$\frac{1,3}{0,4}$	$\frac{2,7}{0,1}$	$\frac{1,2}{0,2}$	$\frac{0,8}{0,3}$
Большая Гнилуша	14	$\frac{-}{2,4}$	$\frac{1,4}{2,6}$	$\frac{1,6}{6,1}$	$\frac{0,8}{3,2}$	$\frac{2,1}{3,3}$	$\frac{2,8}{2,9}$	$\frac{1,4}{3,2}$	$\frac{0,8}{10,4}$
Большая Гнилуша	15	$\frac{0,4}{0,9}$	$\frac{2,6}{1,1}$	$\frac{5,0}{1,5}$	$\frac{2,0}{0,9}$	$\frac{8,3}{1,6}$	$\frac{1,4}{1,0}$	$\frac{3,4}{1,6}$	$\frac{1,4}{3,9}$
Кундрючья	16	$\frac{0,5}{1,0}$	$\frac{0,9}{0,7}$	$\frac{1,3}{1,0}$	$\frac{0,8}{0,8}$	$\frac{1,7}{1,6}$	$\frac{2,8}{0,8}$	$\frac{1,3}{0,9}$	$\frac{0,8}{2,6}$
Кундрючья	17	$\frac{-}{1,2}$	$\frac{1,6}{1,2}$	$\frac{0,9}{1,4}$	$\frac{1,2}{1,1}$	$\frac{5,6}{1,7}$	$\frac{1,1}{1,3}$	$\frac{1,1}{1,4}$	$\frac{0,7}{2,6}$
Кундрючья	18	$\frac{0,4}{1,1}$	$\frac{1,2}{2,0}$	$\frac{1,7}{1,5}$	$\frac{0,8}{1,0}$	$\frac{1,5}{1,7}$	$\frac{3,0}{3,0}$	$\frac{1,2}{1,8}$	$\frac{0,7}{1,3}$
Северский Донец	19	$\frac{0,1}{0,1}$	$\frac{0,3}{0,1}$	$\frac{0,3}{0,2}$	$\frac{0,3}{0,2}$	$\frac{0,3}{0,2}$	$\frac{1,3}{0,3}$	$\frac{0,5}{0,4}$	$\frac{0,3}{0,8}$
Северский Донец	20	$\frac{0,2}{0,3}$	$\frac{0,4}{0,4}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,4}{0,3}$	$\frac{0,7}{0,5}$	$\frac{1,7}{0,6}$	$\frac{1,4}{1,3}$	$\frac{0,4}{0,7}$

Примечание:\* - в числителе - коэффициенты концентрации элементов в пелитовой фракции, в знаменателе - в валовой пробе (относительно соответствующих кларковых значений).

Для того чтобы минимизировать возможные литологические изменения в содержаниях элементов, за минимально аномальную величину концентрации принято значение содержания элемента, превышающее фоновое в 1,5 раза [123]. Чем более коэффициент  $K_c$  превышает выбранное значение, тем выше уровень аномальности содержания металла в пелитовой фракции донных отложений рек. При значениях коэффициента концентрации  $K_c$  ниже 1,5 можно говорить об отсутствии аномалии.

Таблица 17 – Коэффициенты концентрации металлов в донных отложениях рек бассейна Тузлова (составлено автором)

Река	Номер створа	Коэффициенты концентрации							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Большой Несветай	21	<u>0,3</u>	<u>0,7</u>	<u>0,9</u>	<u>0,6</u>	<u>0,9</u>	<u>2,8</u>	<u>0,8</u>	<u>0,2</u>
		0,7	0,6	0,7	0,6	1,1	0,7	0,7	2,6
Большой Несветай	22	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>4,2</u>	<u>0,8</u>	<u>1,6</u>	<u>2,1</u>	<u>1,2</u>	<u>1,5</u>
		1,3	1,3	2,7	1,2	2,0	1,6	1,8	1,0
Большой Несветай	23	<u>0,7</u>	<u>0,6</u>	<u>1,2</u>	<u>0,6</u>	<u>1,2</u>	<u>1,2</u>	<u>0,8</u>	<u>2,0</u>
		1,2	1,1	0,7	0,9	1,7	1,4	1,1	2,0
Малый Несветай	24	<u>0,4</u>	<u>1,1</u>	<u>2,5</u>	<u>0,6</u>	<u>1,9</u>	<u>2,0</u>	<u>1,2</u>	<u>0,8</u>
		0,9	1,0	2,0	0,9	1,9	0,9	1,1	1,3
Малый Несветай	25	<u>0,6</u>	<u>0,9</u>	<u>1,4</u>	<u>0,6</u>	<u>1,4</u>	<u>1,2</u>	<u>0,9</u>	<u>2,1</u>
		0,9	1,0	2,0	1,3	1,6	1,0	1,4	2,0
Малый Несветай	26	<u>0,7</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>0,8</u>	<u>3,2</u>	<u>1,9</u>	<u>1,7</u>	<u>4,9</u>
		0,5	7,6	1,9	0,6	7,4	0,6	3,4	0,4
Аюта	27	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	<u>0,8</u>	<u>1,4</u>	<u>2,0</u>	<u>1,5</u>	<u>4,5</u>
		0,9	1,0	3,2	0,7	1,5	1,0	1,5	1,3
Аюта	28	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>1,4</u>	<u>1,9</u>	<u>0,9</u>	<u>1,6</u>
		1,4	1,4	1,0	1,1	2,0	1,4	1,4	1,3
Аюта	29	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,7</u>	<u>1,1</u>	<u>1,5</u>	<u>7,7</u>	<u>1,6</u>	<u>3,7</u>
		1,0	1,0	1,9	1,5	1,6	1,5	1,5	2,0
Атюхта	30	<u>0,7</u>	<u>0,7</u>	<u>0,5</u>	<u>1,2</u>	<u>1,7</u>	<u>2,4</u>	<u>1,4</u>	<u>3,7</u>
		1,0	3,1	2,4	2,3	3,5	2,9	3,4	5,2
Атюхта	31	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,6</u>	<u>1,1</u>	<u>1,6</u>	<u>3,3</u>	<u>2,1</u>	<u>1,2</u>
		0,8	0,5	0,6	1,4	0,8	2,9	0,9	2,6
Грушевка	32	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>3,1</u>	<u>0,9</u>	<u>1,9</u>	<u>2,1</u>	<u>1,4</u>	<u>4,5</u>
		0,9	1,3	2,1	1,0	1,8	1,2	1,3	1,3
Грушевка	33	<u>0,7</u>	<u>0,9</u>	<u>2,5</u>	<u>1,0</u>	<u>2,2</u>	<u>2,2</u>	<u>1,6</u>	<u>7,6</u>
		0,8	0,9	1,3	1,2	1,5	1,2	4,6	1,3
Грушевка	34	-	<u>1,1</u>	<u>2,5</u>	<u>3,1</u>	<u>1,7</u>	<u>1,1</u>	<u>1,7</u>	<u>1,4</u>
		0,9	1,3	2,8	1,2	1,8	1,6	2,2	2,0
Грушевка	35	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>1,0</u>	<u>1,7</u>	<u>2,3</u>	<u>1,7</u>	<u>1,7</u>
		0,8	0,8	1,0	0,9	1,2	4,9	1,0	2,6
Кадамовка	36	<u>0,7</u>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	<u>1,2</u>	<u>1,4</u>	<u>0,8</u>	<u>1,2</u>
		0,9	0,9	2,7	1,1	1,6	1,5	1,8	5,2
Кадамовка	37	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>1,6</u>	<u>2,6</u>	<u>1,0</u>	<u>1,1</u>
		0,9	0,9	0,3	0,8	1,4	1,1	1,6	2,6
Кадамовка	38	<u>0,3</u>	<u>0,4</u>	<u>0,8</u>	<u>0,3</u>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	<u>0,5</u>	<u>1,0</u>
		1,1	0,9	0,8	1,1	1,6	1,7	1,9	1,3
Тузлов	39	-	<u>1,1</u>	<u>1,0</u>	<u>4,1</u>	<u>1,4</u>	<u>1,1</u>	<u>1,1</u>	<u>0,9</u>
		0,8	0,8	1,3	1,0	1,3	1,0	1,4	3,9

Река	Номер створа	Коэффициенты концентрации							
		Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Тузлов	40	-	<u>1,1</u>	<u>0,8</u>	<u>3,1</u>	<u>1,7</u>	<u>1,4</u>	<u>3,4</u>	<u>0,9</u>
		1,2	1,1	1,3	1,6	1,8	2,7	12,9	2,6
Примечание:* - в числителе - коэффициенты концентрации элементов в пелитовой фракции, в знаменателе - в валовой пробе (относительно соответствующих кларковых значений).									

В валовых пробах аномальные содержания отмечены по всем элементам. В донных отложениях бассейна Северского Донца аномальные содержания Cr отмечены в 10 створах, Zn и Ni – в 9, Pb – в 7, Co и Mn – в 5, Cu – в 2 створах, Fe – в 1 створе.

Для бассейна Тузлова наблюдается несколько иная картина распределения: аномальные содержания Ni отмечены в 13 створах, Cr – в 12 створах, Zn – в 11 створах, Mn – в 10 створах, Pb – в 9 створах, Cu – в 3 створах, Co – в 2 створах. Аномальных содержаний Fe в валовых пробах осадков рек бассейна Тузлова не обнаружено.

В выделенной пелитовой фракции аномальные содержания отмечены для всех элементов, кроме железа. В донных отложениях бассейна Северского Донца аномальные содержания Pb отмечены в 15 створах, Ni – в 11, Mn – в 6 створах, Co – в 4 створах, Zn и Cu – в 3 створах. При этом подобных содержаний хрома в осадках рек бассейна не обнаружено.

Для бассейна Тузлова аномальные содержания Pb наблюдаются в 13 створах, Ni – в 12 створах, Cr – в 10 створах, Zn – в 8 створах, Mn – в 6 створах, Cu – в 3 створах. Аномальных содержаний кобальта в осадках бассейна Тузлова не обнаружено.

Распределение аномалий по рекам бассейнов также является неоднородным. В бассейне Северского Донца выделяется устьевой створ реки Большая Гнилуша, где аномальные содержания в пелитовой фракции наблюдаются по 5 металлам, а в валовой пробе – по всем 8 элементам. Также наибольшее число аномальных содержаний отмечено для среднего и верхнего створов реки Лихая: для верхнего

створа – 6 элементов как в пелитовой фракции, так и в общей пробе; для среднего створа – 5 элементов в валовой пробе, 4 – в пелитовой фракции. Напротив, для рек Калитва, Быстрая и Северский Донец характерно либо отсутствие аномальных содержаний элементов, либо превышение кларковых значений в 1,5 раза по одному элементу (по свинцу в пелитовой фракции, по свинцу или хрому в валовых пробах).

В донных отложениях бассейна Тузлова наибольшим числом аномальных содержаний элементов в валовой пробе характеризуется устьевой створ реки Атюхты (7), также большое число таких содержаний отмечено в верхнем створе реки Аюта (6), а также верхнем створе реки Тузлов, устьевом створе реки Кадамовка и верхнем створе реки Грушевка (по 5 элементов). Наибольшее число аномальных содержаний элементов в пелитовой фракции характерно для верхнего створа реки Малый Несветай и нижнего створа реки Грушевка (по 5 элементов). В целом, для бассейна Тузлова заметно большее несоответствие между содержаниями элементов в валовой пробе и пелитовой фракции.

Для каждого створа, в донных отложениях которых отмечены аномальные содержания металлов на участке реки, составлена формула геохимической ассоциации. Данная формула представляет собой ранжированный ряд металлов по значениям и позволяет охарактеризовать элементный состав и структуру геохимической аномалии. В формуле, помимо качественной элементной характеристики, приведена также величина  $K_c$  в виде нижнего индекса.

Геохимическая ассоциация тяжелых металлов по накоплению в пелитовой фракции донных отложений по осредненным данным для рек бассейна Северского Донца имеет вид:  $Pb_{2,3} Ni_{2,1}$ . В то же время ассоциация металлов по накоплению в общем объеме осадка в среднем выглядит следующим образом:  $Cr_{2,7} Zn_{1,6}$ . В таблице 18 представлены формулы геохимических ассоциаций элементов в донных отложениях рек бассейна Северского Донца.

Таблица 18 – Формулы геохимической ассоциации элементов в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (составлено автором)

Река	Номер створа	Формула геохимической ассоциации
Большая Каменка	1	Pb <sub>3,6</sub> Ni <sub>1,6</sub> Cr <sub>2,0</sub> Pb <sub>1,9</sub> Ni <sub>1,7</sub>
Большая Каменка	2	Pb <sub>3,3</sub> Ni <sub>2,2</sub> Mn <sub>1,8</sub> Pb <sub>3,5</sub> Co <sub>1,8</sub> Ni <sub>1,7</sub> Mn <sub>1,6</sub> Zn <sub>1,5</sub>
Малая Каменка	3	Pb <sub>2,5</sub> Zn <sub>1,9</sub> Ni <sub>1,5</sub> Cr <sub>5,2</sub>
Малая Каменка	4	Pb <sub>3,3</sub> Ni <sub>1,8</sub> Pb <sub>1,5</sub> Zn <sub>1,5</sub>
Малая Каменка	5	Pb <sub>3,5</sub> Cr <sub>7,8</sub> Zn <sub>3,7</sub>
Лихая	6	Pb <sub>1,6</sub> Cr <sub>2,0</sub>
Лихая	7	Ni <sub>4,2</sub> Co <sub>2,6</sub> Mn <sub>2,5</sub> Cu <sub>1,6</sub> Mn <sub>3,5</sub> Zn <sub>3,3</sub> Ni <sub>2,6</sub> Co <sub>2,2</sub> Pb <sub>1,9</sub>
Лихая	8	Pb <sub>4,1</sub> Mn <sub>3,3</sub> Zn <sub>2,7</sub> Ni <sub>2,4</sub> Co <sub>2,2</sub> Cu <sub>1,6</sub> Co <sub>3,8</sub> Zn <sub>3,7</sub> Ni <sub>3,4</sub> Cu <sub>2,9</sub> Mn <sub>2,1</sub> Pb <sub>1,6</sub>
Калитва	9	Pb <sub>2,4</sub> Zn <sub>4,1</sub>
Калитва	10	- Cr <sub>2,0</sub>
Калитва	11	Pb <sub>2,1</sub> -
Быстрая	12	Pb <sub>1,5</sub> Cr <sub>5,2</sub>
Быстрая	13	Pb <sub>2,7</sub> -
Большая Гнилуша	14	Ni <sub>8,3</sub> Mn <sub>5,0</sub> Zn <sub>3,4</sub> Co <sub>2,6</sub> Cu <sub>2,0</sub> Cr <sub>10,4</sub> Mn <sub>6,1</sub> Ni <sub>3,3</sub> Cu <sub>3,2</sub> Zn <sub>3,2</sub> Pb <sub>2,9</sub> Co <sub>2,6</sub> Fe <sub>2,4</sub>
Большая Гнилуша	15	Pb <sub>3,0</sub> Mn <sub>1,7</sub> Ni <sub>1,5</sub> Cr <sub>3,9</sub> Ni <sub>1,6</sub> Zn <sub>1,6</sub> Mn <sub>1,5</sub>
Кундрючья	16	Pb <sub>2,8</sub> Ni <sub>1,7</sub> Cr <sub>2,6</sub> Ni <sub>1,6</sub>
Кундрючья	17	Ni <sub>5,6</sub> Co <sub>1,6</sub> Cr <sub>3,9</sub> Ni <sub>1,7</sub>
Кундрючья	18	Pb <sub>2,8</sub> Ni <sub>2,1</sub> Mn <sub>1,6</sub> Pb <sub>3,0</sub> Co <sub>2,0</sub> Zn <sub>1,8</sub> Ni <sub>1,7</sub>
Северский Донец	19	- -
Северский Донец	20	Pb <sub>1,7</sub> -
Среднее по бассейну		Pb <sub>2,3</sub> Ni <sub>2,1</sub> Cr <sub>2,7</sub> Zn <sub>1,6</sub>
Примечание: для каждого створа представлены две формулы: верхняя строчка – ассоциация элементов по их содержанию в пелитовой фракции, нижняя – в валовой пробе.		

Формула геохимической аномалии для пелитовой фракции донных отложений рек бассейна Тузлова в среднем будет выглядеть следующим образом:  $Cr_{2,3} Pb_{2,2} Ni_{1,6}$ . При этом для валовых содержаний элементов геохимическая ассоциация в целом по бассейну имеет другой вид:  $Zn_{2,4} Cr_{2,2} Ni_{2,0} Pb_{1,6} Mn_{1,6}$ . Формулы геохимических ассоциаций по створам рек бассейна Тузлова приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Формулы геохимической ассоциации элементов в донных отложениях рек бассейна Тузлова (составлено автором)

Река	Номер створа	Формула геохимической ассоциации
Большой Несветай	21	$Pb_{2,8}$ $Cr_{2,6}$
Большой Несветай	22	$Mn_{4,2} Pb_{2,1} Ni_{1,6}$ $Mn_{2,7} Ni_{2,0} Zn_{1,6} Pb_{1,6}$
Большой Несветай	23	$Cr_{2,0}$ $Cr_{2,0} Ni_{1,7}$
Малый Несветай	24	$Mn_{2,5} Pb_{2,0} Ni_{1,9}$ $Mn_{2,0} Ni_{1,9}$
Малый Несветай	25	$Cr_{2,1}$ $Mn_{2,0} Cr_{2,0} Ni_{1,6}$
Малый Несветай	26	$Cr_{4,9} Ni_{3,2} Mn_{2,5} Pb_{1,9} Zn_{1,7}$ $Co_{7,6} Ni_{7,4} Zn_{3,4} Mn_{1,9}$
Аюта	27	$Cr_{4,5} Pb_{2,0} Zn_{1,5}$ $Mn_{3,2} Zn_{1,5}$
Аюта	28	$Pb_{1,9} Cr_{1,6}$ $Ni_{2,0}$
Аюта	29	$Pb_{7,7} Cr_{3,7} Zn_{1,6} Ni_{1,5}$ $Cr_{2,0} Mn_{1,9} Ni_{1,6} Pb_{1,5} Cu_{1,5} Zn_{1,5}$
Атюхта	30	$Cr_{3,7} Pb_{2,4} Ni_{1,7}$ $Cr_{5,2} Ni_{3,5} Zn_{3,4} Co_{3,1} Pb_{2,9} Mn_{2,4} Cu_{2,3}$
Атюхта	31	$Pb_{3,3} Zn_{2,1} Ni_{1,6}$ $Pb_{2,9} Cr_{2,6}$
Грушевка	32	$Cr_{4,5} Mn_{3,1} Pb_{2,1} Ni_{1,9}$ $Mn_{2,1} Ni_{1,8}$
Грушевка	33	$Cr_{7,6} Mn_{2,5} Pb_{2,2} Ni_{2,2} Zn_{1,6}$ $Zn_{4,6}$
Грушевка	34	$Cu_{3,1} Mn_{2,5} Zn_{1,7} Ni_{1,7}$ $Mn_{2,8} Zn_{2,2} Cr_{2,0} Ni_{1,8} Pb_{1,6}$
Грушевка	35	$Pb_{2,3} Cr_{1,7} Ni_{1,7} Zn_{1,7}$ $Pb_{4,9} Cr_{2,6}$
Кадамовка	36	- $Cr_{5,2} Mn_{2,7} Zn_{1,8} Ni_{1,6} Pb_{1,5}$

Река	Номер створа	Формула геохимической ассоциации
Кадамовка	37	$Pb_{2,6} Ni_{1,6}$ $Cr_{2,6} Zn_{1,6}$
Кадамовка	38	- $Zn_{1,9} Pb_{1,7} Ni_{1,6}$
Тузлов	39	$Cu_{4,1}$ $Cr_{3,9}$
Тузлов	40	$Zn_{3,4} Cu_{3,1} Ni_{1,7}$ $Zn_{12,9} Pb_{2,7} Cr_{2,6} Ni_{1,8} Cu_{1,6}$
Среднее по бассейну		$Cr_{2,3} Pb_{2,2} Ni_{1,6}$ $Zn_{2,4} Cr_{2,2} Ni_{2,0} Pb_{1,6} Mn_{1,6}$
Примечание: для каждого створа представлены две формулы: верхняя строчка – ассоциация элементов по их содержанию в пелитовой фракции, нижняя – в валовой пробе.		

Обращает на себя внимание, что во многих случаях наборы элементов с аномальными содержаниями для пелитовой фракции и валовой пробы различаются. Это указывает на то, что в отдельных случаях элементы накапливаются не только в пелитовой фракции, но и в минералах тяжелой фракции. Как показывают исследования [55], с аморфными гидроксидами железа и марганца, входящими в состав речной взвеси может быть связано до 72,5 % свинца и до 60 % кобальта, а также значительное количество хрома, цинка и других металлов. В работе [42] показано, что в осадках с высоким содержанием ильменита (основного терригенного минерала тяжелой фракции) наблюдаются высокие содержания марганца, ванадия и хрома. При этом в отложениях, обогащенных магнетитом/гематитом, фиксируются аномально высокие концентрации меди, свинца и цинка в тяжелой фракции. По этой причине имеет смысл рассмотреть по отдельности содержания элементов в донных отложениях в целом и в пелитовой фракции.

Для наглядности представления пространственной изменчивости химического состава донных отложений с помощью программы *QGIS* построены картосхемы различных компонентов донных отложений рек Восточного Донбасса. С использованием функции «*Интерполяция IDW*» методом обратнo-степенных расстояний были получены растеризованные интерполяционные поверхности содержаний хрома, никеля, цинка, свинца, марганца и железа, при

этом за основу для картирования были взяты абсолютные значения концентраций элементов в валовых пробах донных осадков и выделенной пелитовой фракции. Для того, чтобы различные концентрации было удобно сравнивать между собой, в картосхемах выделены 4 диапазона. Первому соответствуют значения содержаний элементов ниже 1,5 кларка [23], второй диапазон включает значения от 1,5 до 2 кларков, третий диапазон – от 2 до 4 кларков, в четвертый диапазон значений входят концентрации, превышающие кларковые содержания более чем в 4 раза.

Распределение содержания хрома в валовой пробе и пелитовой фракции донных отложений представлено на рисунках 13 и 14. Как видно из данных картосхем, хром в донных осадках в целом встречается характеризуется аномальными содержаниями в обоих рассматриваемых бассейнах. Отмечены участки рек, где содержания хрома превышают кларковые более, чем в 4 раза: створ 14 реки Большая Гнилуша, створы 3 и 5 реки Малая Каменка, створ 12 реки Быстрая в бассейне Северского Донца; створ 30 реки Атюхта и створ 36 реки Кадамовка в бассейне Тузлова (рисунок 13).

Распределение содержания хрома в пелитовой фракции имеет большой контраст между бассейнами, нежели в случае с концентрациями в валовых пробах. В бассейне Северского Донца не наблюдается створов с аномальными содержаниями хрома, в то время как в бассейне Тузлова половина створов характеризуется аномальными содержаниями данного элемента. Наибольшие концентрации хрома (превышение кларка в 4 и более раз) выявлены в створах 26 реки Малый Несветай, створе 27 реки Аюта и створах 32 и 33 реки Грушевка.

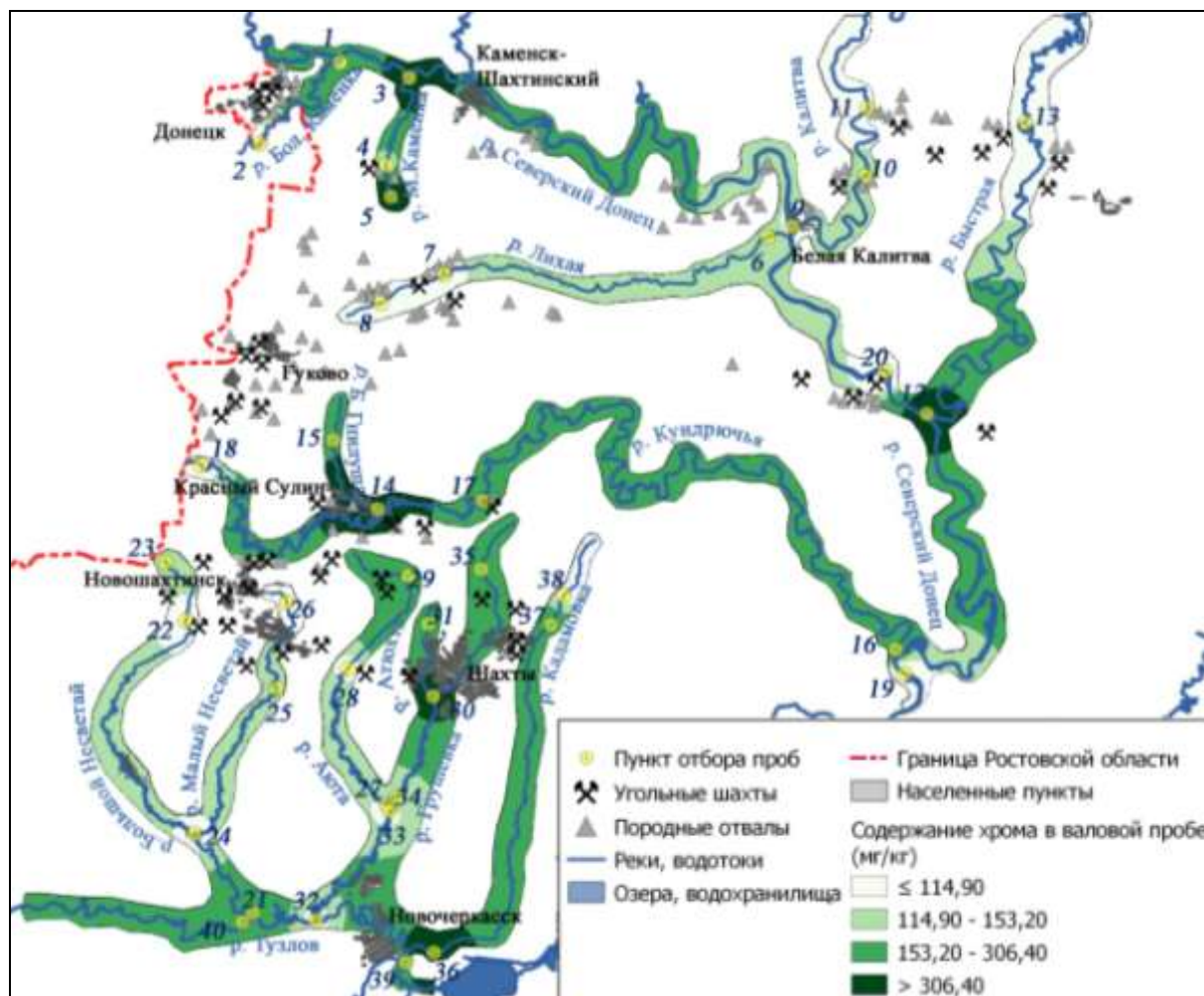


Рисунок 13 – Распределение содержания хрома в донных отложениях рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Из этого можно сделать вывод, что в бассейне Северского Донца хром имеет тенденцию накапливаться преимущественно в песчано-алевритовой и тяжелой фракциях, тогда как в бассейне Тузлова – в основном, в пелитовой фракции. Как указывают авторы исследования [42], хром в тяжелой фракции концентрируется в ильмените и редко встречающихся минералах группы хромшпинелидов.

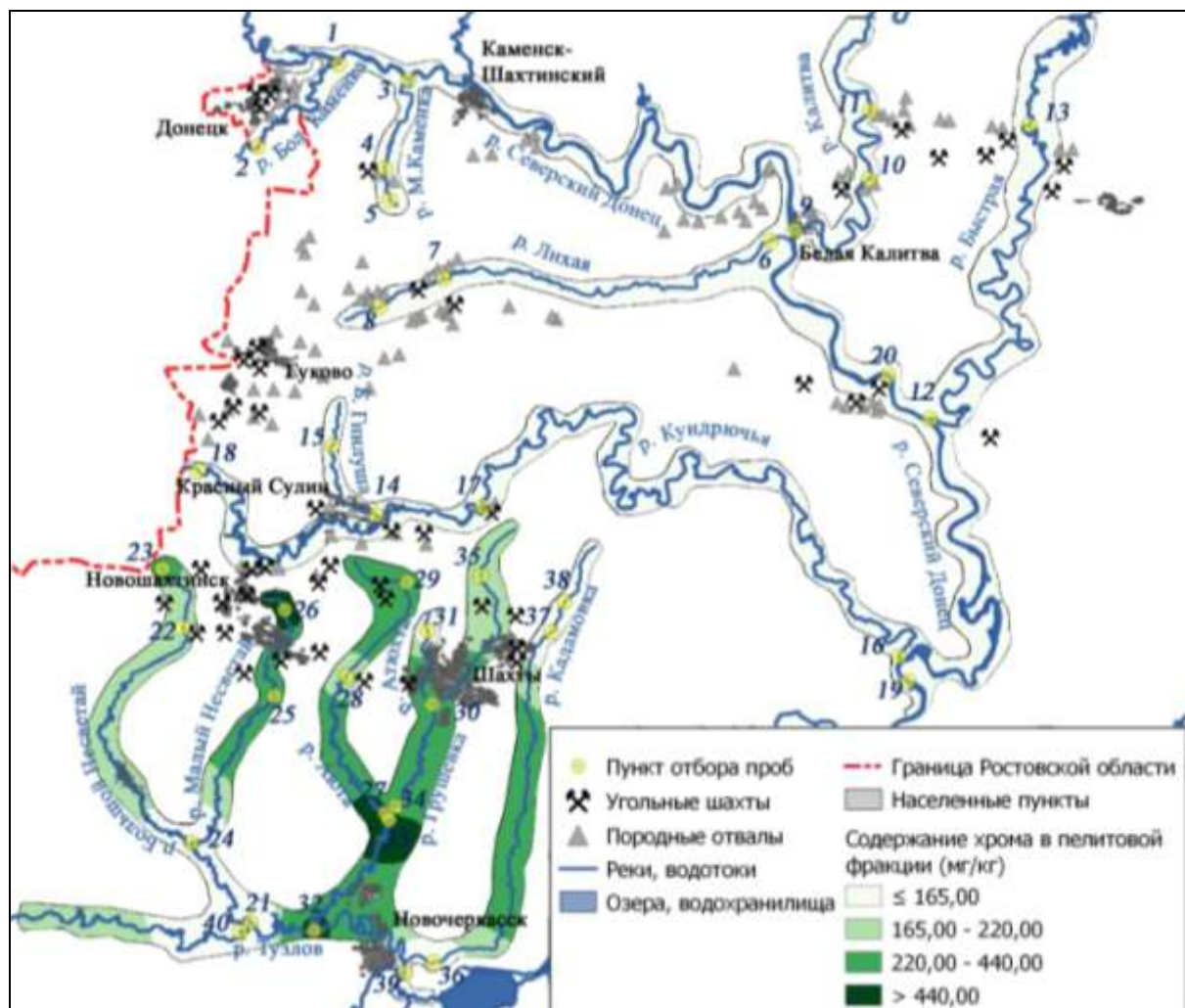


Рисунок 14 – Распределение содержания хрома в пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

На рисунках 15 и 16 представлены особенности распределения никеля в донных отложениях рек Восточного Донбасса и в пелитовой фракции речных осадков. В донных осадках рек бассейна Северского Донца повышенные содержания (в 2-4 раза выше кларка) никеля наблюдаются в створах 7 и 8 реки Лихая, а также створе 14 реки Большая Гнилуша. В бассейне Тузлова наибольшее содержание никеля характерно для верхнего створа реки Малый Несветай (в 4 раза выше кларка). Повышенные значения отмечены в 22 створе реки Большой Несветай, 28 створе реки Аюта, 30 створе реки Атюхта.

В целом, содержания никеля закономерно выше вблизи крупных населенных пунктов и в районах наиболее интенсивного воздействия предприятий угледобывающей промышленности.

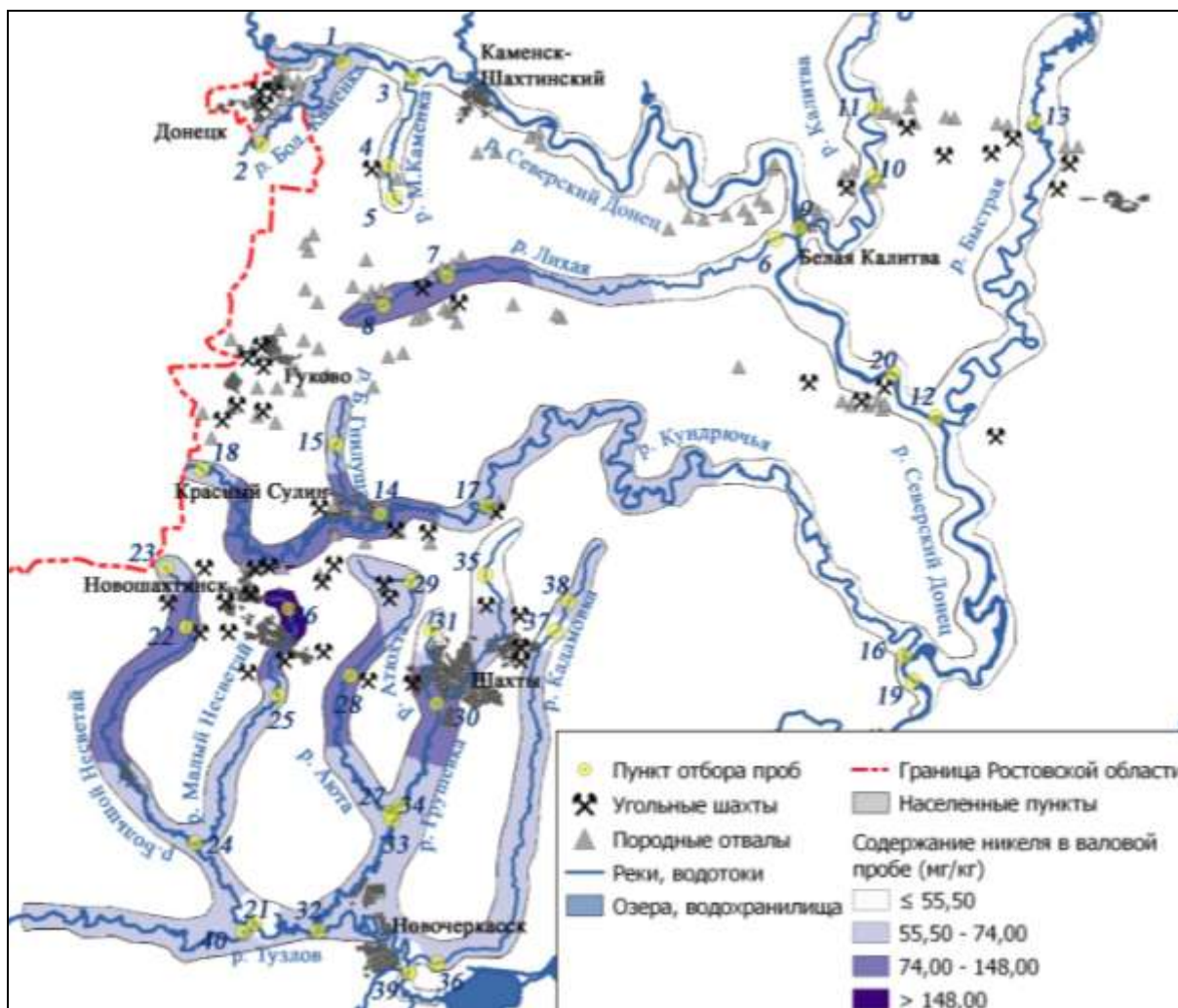


Рисунок 15 – Распределение содержания никеля в донных отложениях рек Восточного Донбасса (составлено автором)

В пелитовой фракции донных отложений рек бассейна Северского Донца содержания никеля заметно выше, чем в валовой пробе. Во многом это обусловлено его физико-химическими особенностями. Как указывают авторы исследования [55], существенную роль в связывании никеля и его переносе в речных водах играют глинистые частицы. При этом взвешенная форма миграции соединений никеля преобладает над растворенной. Благодаря адсорбционным процессам никель способен накапливаться в донных отложениях рек.

Наибольшие значения характерны для створов 14 реки Большая Гнилуша, 17 реки Кундрючья и 7 реки Лихая. При этом в верхних створах рек Кундрючья, Лихая и Большая Гнилуша концентрации являются повышенными (превышение кларка в 2-4 раза). В бассейне Тузлова содержания никеля в пелитовой фракции

на большинстве участков рек являются аномальными, однако в среднем значения ниже, чем в валовых пробах (рисунок 16).

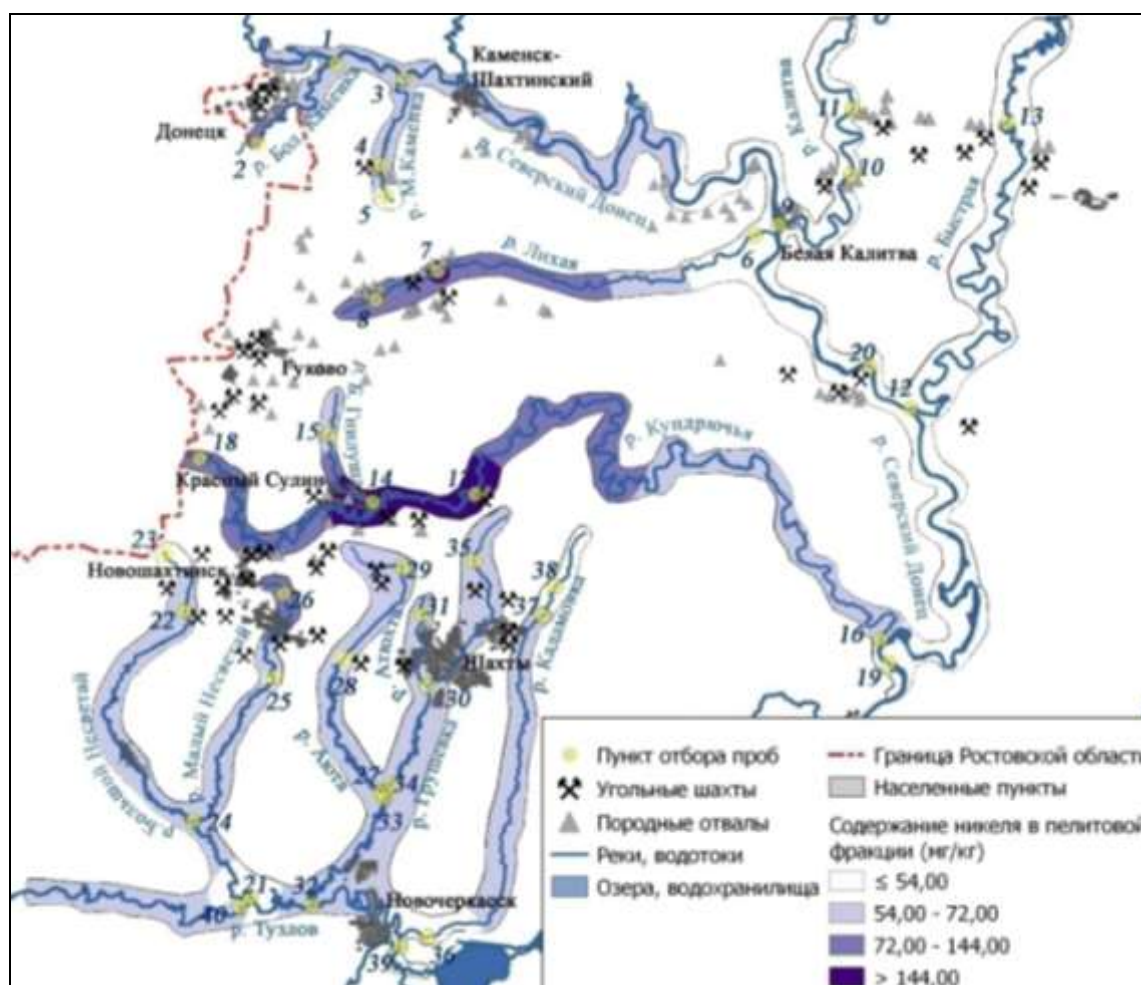


Рисунок 16 – Распределение содержания никеля в пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Тем самым, можно сказать, что в бассейне Северского Донца большая часть никеля связана с глинистым веществом пелитовой фракции, в то время как в бассейне Тузлова содержания никеля в донных отложениях в целом и в пелитовой фракции сопоставимы (за исключением створа 36).

Распределение содержаний цинка в донных отложениях рек Восточного Донбасса и в пелитовой фракции осадков показано на рисунках 17 и 18. Обращает на себя внимание тот факт, что кларк осадочных пород цинка в целом значительно ниже, чем для глин и глинистых сланцев. По этой причине, по

абсолютным значениям содержания цинка выше именно в пелитовой фракции, но по коэффициентам концентрации, рассчитанным относительно соответствующих кларков, содержания выше именно в валовых пробах.

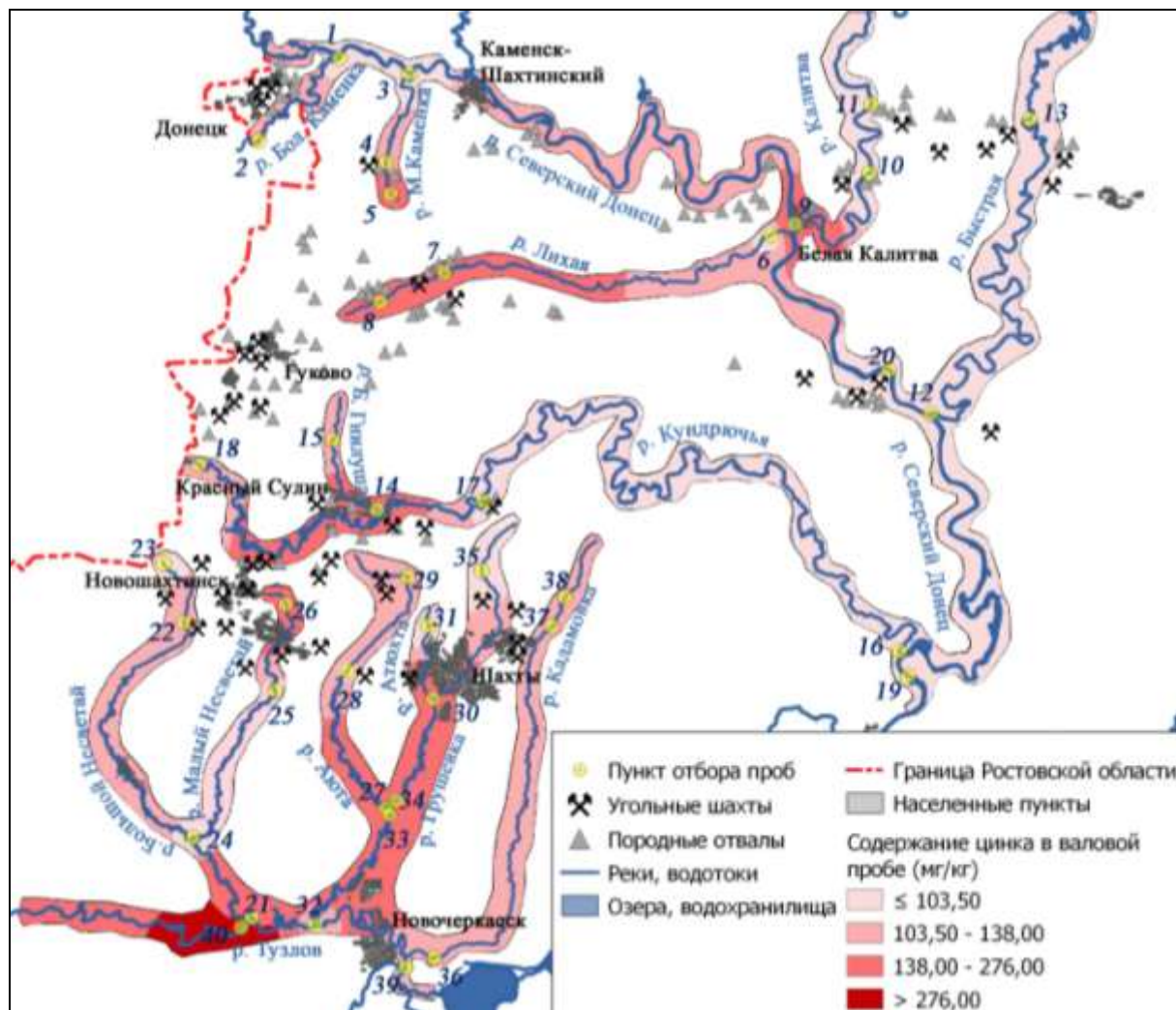


Рисунок 17 – Распределение содержания цинка в донных отложениях рек Восточного Донбасса (составлено автором)

В донных отложениях в целом содержания цинка выше в бассейне Тузлова, чем в бассейне Северского Донца, и наибольшие концентрации отмечены в створах 40 реки Тузлов и 33 реки Грушевка. В бассейне Северского Донца только на одном участке коэффициент концентрации превышает 4 – створ 9 реки Калитва.

Содержания цинка в пелитовой фракции осадков (рисунок 18) рассматриваемых речных бассейнов в целом сопоставимы. В бассейне Тузлова

наибольшие значения характерны для створа 40 реки Тузлов и створа 27 реки Аюта. В бассейне Северского Донца повышенными содержаниями цинка характеризуются створ 14 реки Большая Гнилуша и створ 8 реки Лихая.

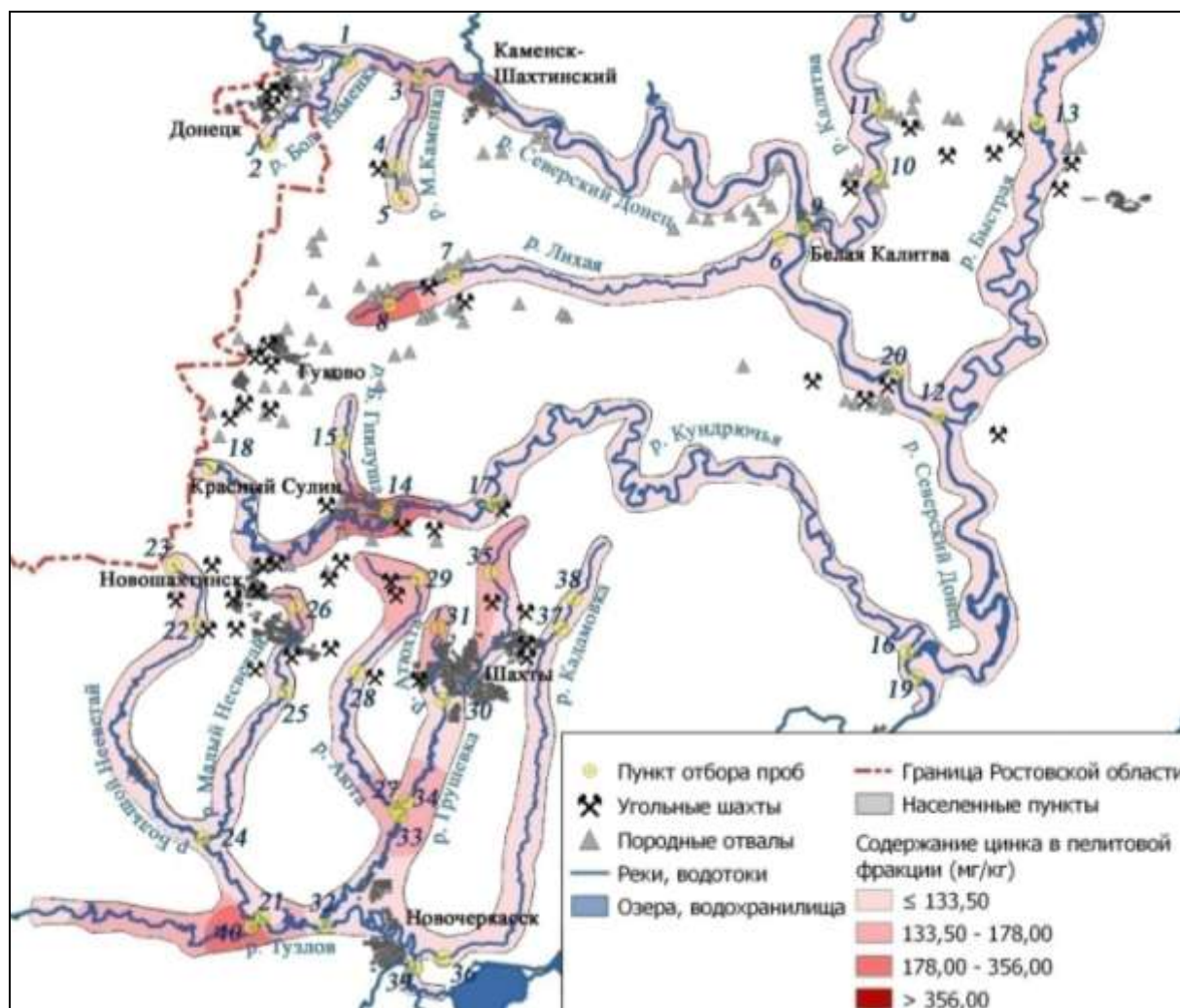


Рисунок 18 – Распределение содержания цинка в пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

В створе 9 реки Калитва наблюдается высокое содержание цинка в валовой пробе, тогда как в пелитовой фракции концентрация цинка будет ниже кларкового значения (280 и 65 мг/кг соответственно). С учетом того, что выход пелитовой фракции составляет всего 19 %, можно сделать вывод, что в данном створе этот элемент связан преимущественно с минералами песчано-алевритовой и тяжелой фракции. Как указывают авторы [42, 107], цинк в донных отложениях находится в труднодоступной форме, преимущественно связан с гидроокислами

железа. В данном створе как раз и наблюдаются повышенные содержания гидроокислов железа именно в песчано-алевритовой фракции, чем и можно объяснить данную особенность в распределении.

В остальном же в целом для содержаний цинка в пелитовой фракции характерны более высокие значения, что указывает на отмечаемое авторами [42, 55] свойство цинка связываться с глинистыми минералами пелитовой фракции.

Рисунки 19 и 20 показывают особенности распределения свинца в донных отложениях и пелитовой фракции осадков рек Восточного Донбасса. Наибольшими содержаниями в валовой пробе рассматриваемого здесь элемента характеризуется створ 35 реки Грушевка, также сравнительно высоки значения в обоих створах реки Атюхта и створе 40 реки Тузлов.

В бассейне Северского Донца содержания свинца в валовой пробе ниже, чем для бассейна Тузлова. Сравнительно высокие концентрации отмечены в створах 2 реки Большая Каменка, 14 реки Большая Гнилуша и 18 реки Кундрючья.

Содержания свинца в пелитовой фракции заметно выше, чем в валовой пробе, причем это характерно для обоих рассматриваемых бассейнов. Этому способствует высокое сродство ионов свинца (II) к природным адсорбентам (гидроксиды металлов, глинистые частицы). Согласно данным [73], свинец способен практически полностью сорбироваться и осаждаться при значениях pH выше 6,0 и отсутствии растворимых комплексообразующих форм. Кроме того, большую роль в процессах сорбции свинца из водной толщи будут играть процессы комплексообразования с гуминовыми кислотами.

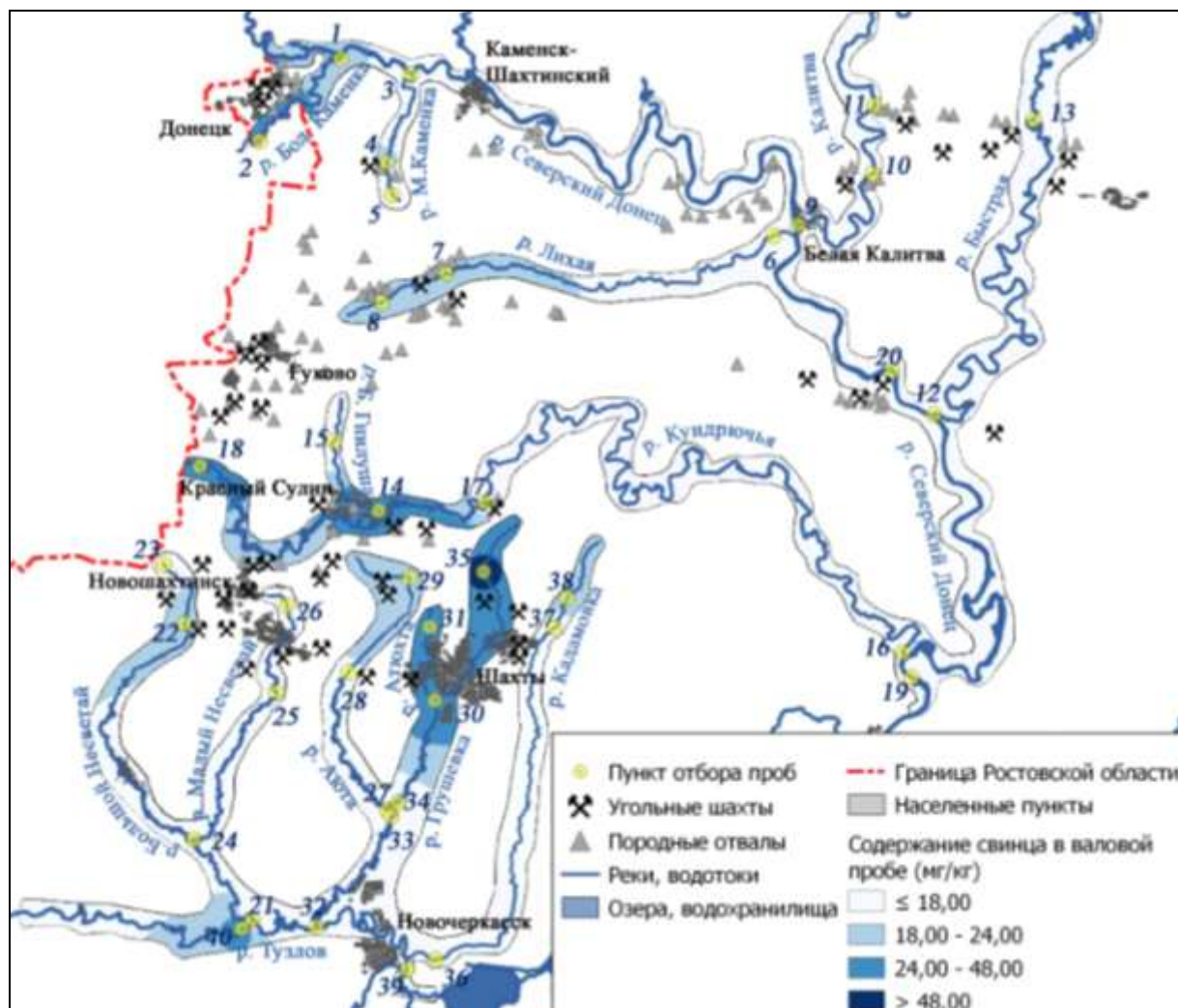


Рисунок 19 – Распределение содержания свинца в донных отложениях рек Восточного Донбасса (составлено автором)

«Поэтому в исследуемом районе, где речные воды характеризуются слабощелочной реакцией среды 8,0–8,5, свинец будет накапливаться преимущественно в донных отложениях за счет высокого содержания глинистых минералов пелитовой фракции, а также сорбции и осаждения свинца с гуминовыми кислотами» [93, с. 99].

В пелитовой фракции наибольшие содержания свинца отмечены в створе 29 реки Аюта, повышенные значения также характерны для створов 21 и 22 реки Большой Несветай, 24 реки Малый Несветай, 27 реки Аюта, 32, 33 и 35 реки Грушевка и створа 37 реки Кадамовка.

В бассейне Северского Донца наибольшее содержание свинца в пелитовой фракции отмечено в створе 8 реки Лихая. Аномальные значения отсутствуют

только в створах 7 реки Лихая, 10 реки Калитва, 17 реки Кундрючья и 19 реки Северский Донец.

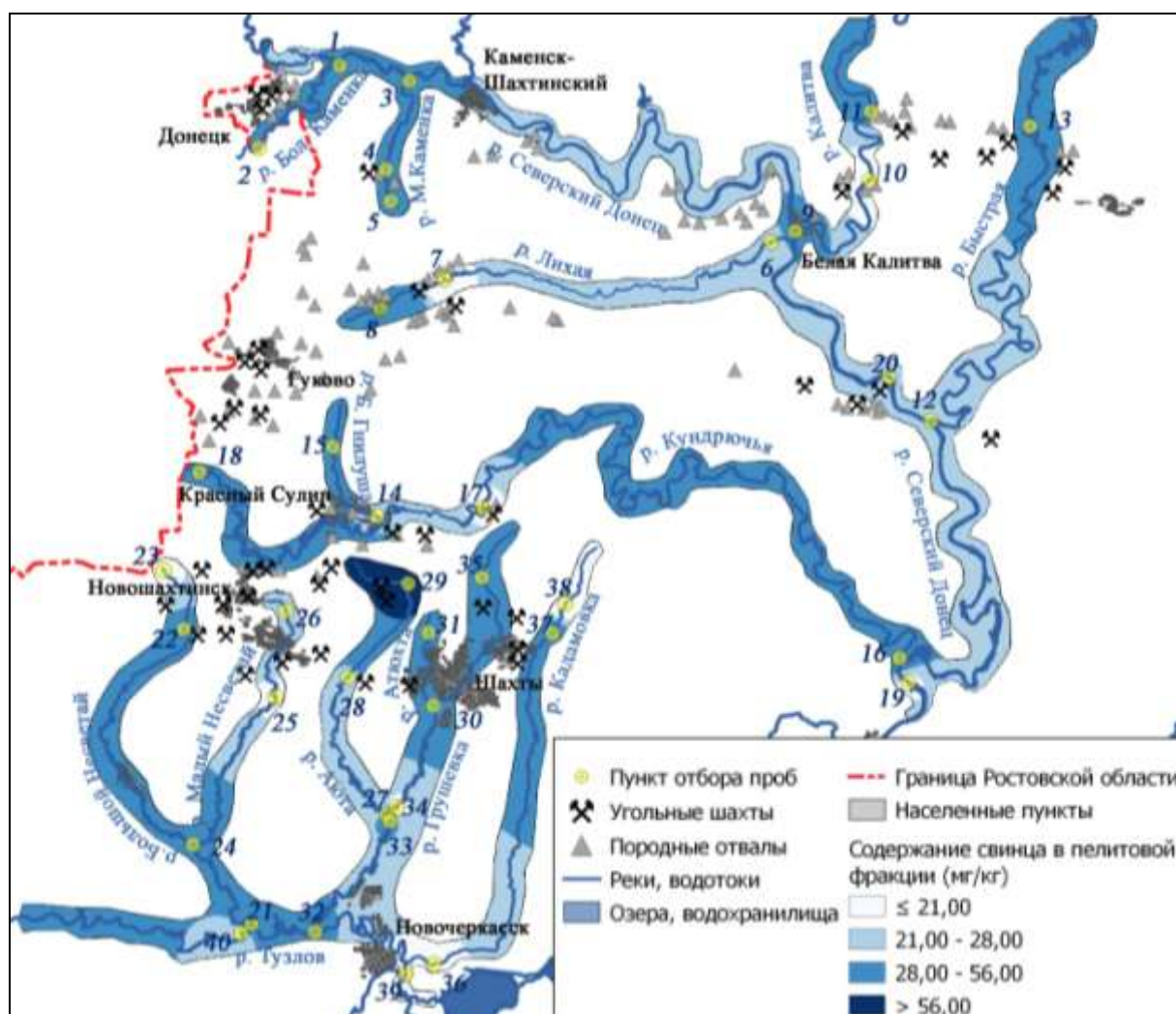


Рисунок 20 – Распределение содержания свинца в пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Из приведенных выше данных следует, что свинец склонен накапливаться в пелитовой фракции донных отложений рек исследуемого района, и данная закономерность подтверждается и исследованиями других авторов [42, 55]. Как указывается в работе [107], в зоне техногенного загрязнения донных отложений отдельных водотоков может увеличиваться доля подвижных и условно подвижных форм Pb, связанных с гидроокислами железа.

На рисунках 21 и 22 представлены картосхемы распределения содержания марганца в донных отложениях рек Восточного Донбасса в целом и в пелитовой фракции осадка соответственно.

Наибольшее содержание марганца в валовой пробе наблюдается в створе 14 реки Большая Гнилуша, повышенными значениями также характеризуются створы 7 и 8 реки Лихая, створ 22 реки Большой Несветай, створ 27 реки Аюта, створ 30 реки Атюхта, створы 32 и 34 реки Грушевка и створ 36 реки Кадамовка. В целом, для донных отложений рек бассейна Тузлова характерны большие концентрации марганца по сравнению с бассейном Северского Донца.

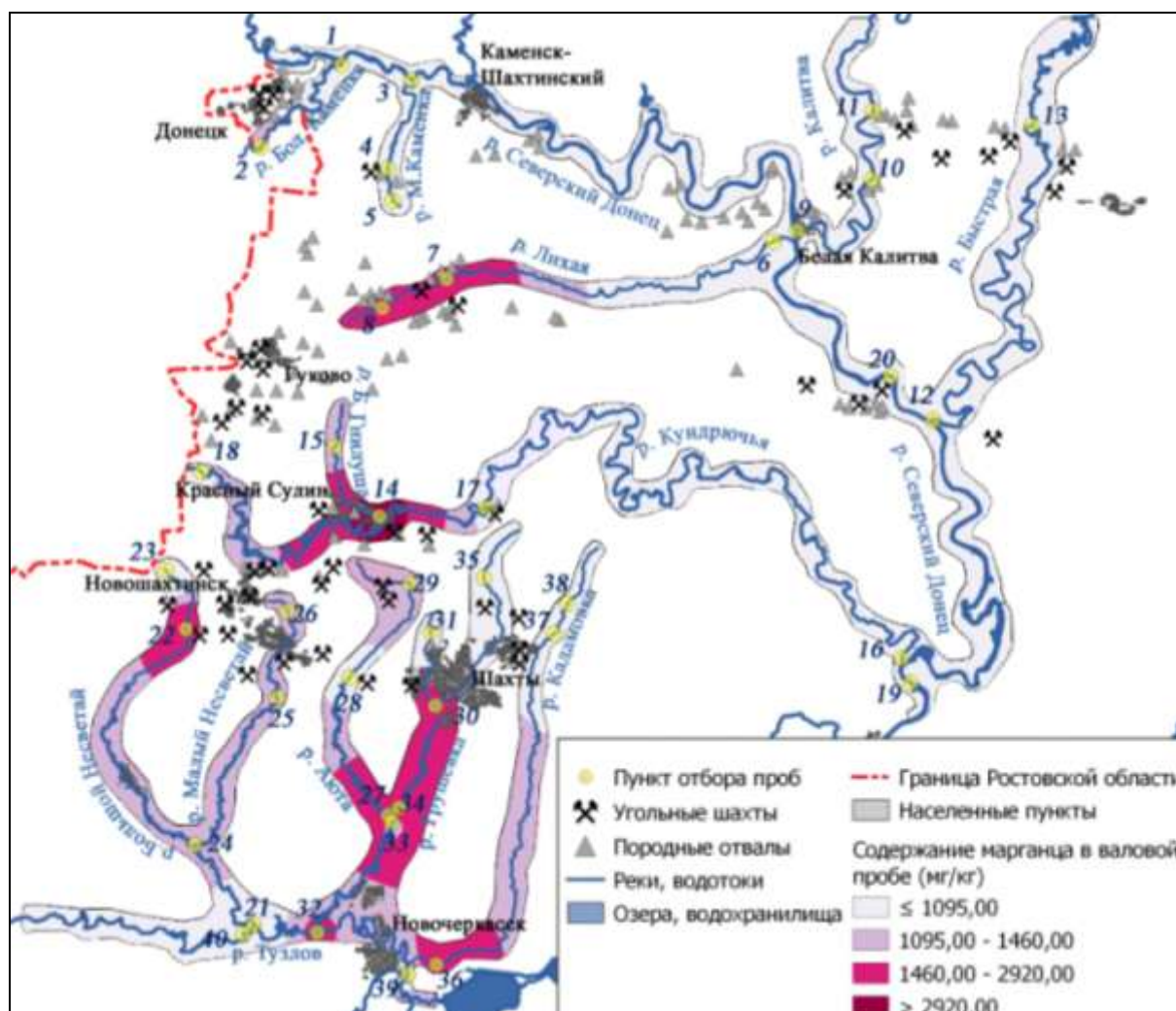


Рисунок 21 – Распределение содержания марганца в донных отложениях рек Восточного Донбасса (составлено автором)

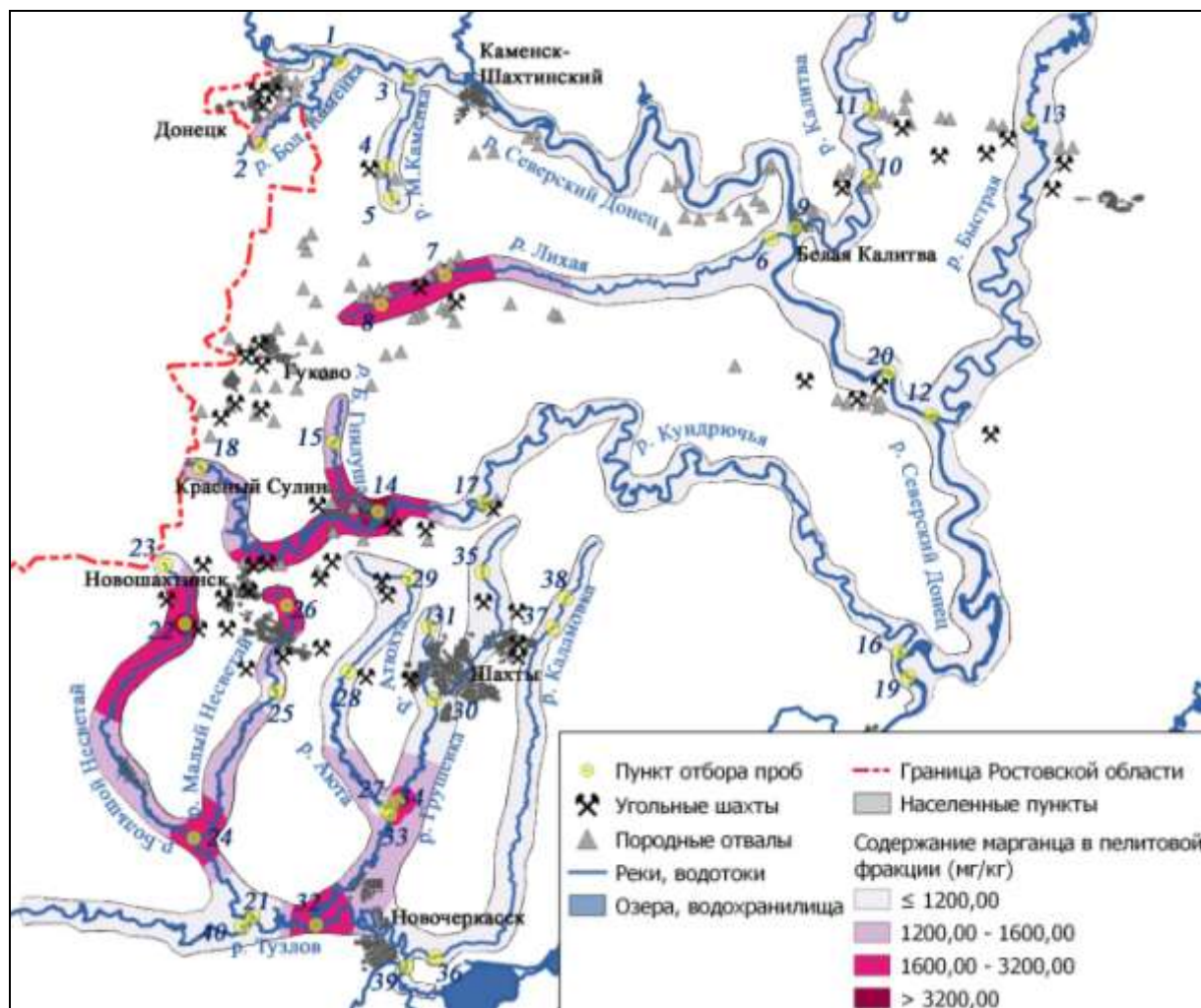


Рисунок 22 – Распределение содержания марганца в пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Наибольшими содержаниями марганца в пелитовой фракции характеризуется створ 14 реки Большая Гнилуша (как и в валовых пробах), а также створ 22 реки Большой Несветай. Повышенные содержания отмечены в створах реки Лихая, Малый Несветай и Грушевка.

Пелитовая фракция донных отложений рек Восточного в целом характеризуется высокими концентрациями марганца. Как показано в исследовании [42], аномальное содержание марганца в речных отложениях наблюдается в створах, в которых содержание пелитовой фракции составляет более 80 %. Несмотря на эту тенденцию, в ряде створов бассейна Тузлова содержания элементов в пелитовой фракции ниже, чем в осадке в целом.

«Марганец в поверхностных водах ведет себя совершенно по-разному в зависимости от сочетания физико-химических факторов, среди которых окислительно-восстановительная обстановка (Eh), pH водной среды, наличие лигандов или других комплексообразователей, содержание взвешенных веществ и др. При снижении Eh и pH марганец способен накапливаться в водной толще. Способность марганца (II) к окислению, а также процессы адсорбции способствуют его накоплению в донных отложениях» [93, с. 97].

Значительное количество марганца сорбируется на речной взвеси при высоком содержании пелитовой фракции и преобладании в составе последней глинистых минералов [55]. Однако в малых реках, зарегулированных большим количеством плотин и водохранилищ и имеющих большую извилистость, формируются условия для осаждения соединений марганца в составе речной взвеси и накоплению их в донных осадках.

На рисунках 23 и 24 представлены картосхемы распределения содержания железа в донных отложениях в целом и в пелитовой фракции. Несмотря на то, что аномальных содержаний железа в пределах обоих бассейнов не обнаружено, стоит рассмотреть особенности его распространения. Из-за широкой распространенности железа в земной коре и осадочных породах и достаточно высокого кларкового содержания в картосхемах содержаний железа использовалась следующая градация: первому диапазону соответствуют значения содержаний элементов ниже 0,5 кларка [23], второй включает значения от 0,5 до 1,0 кларка, третий диапазон – от 1,0 до 1,5 кларков, в четвертый входят концентрации, превышающие кларковые содержания более чем в 1,5 раза.

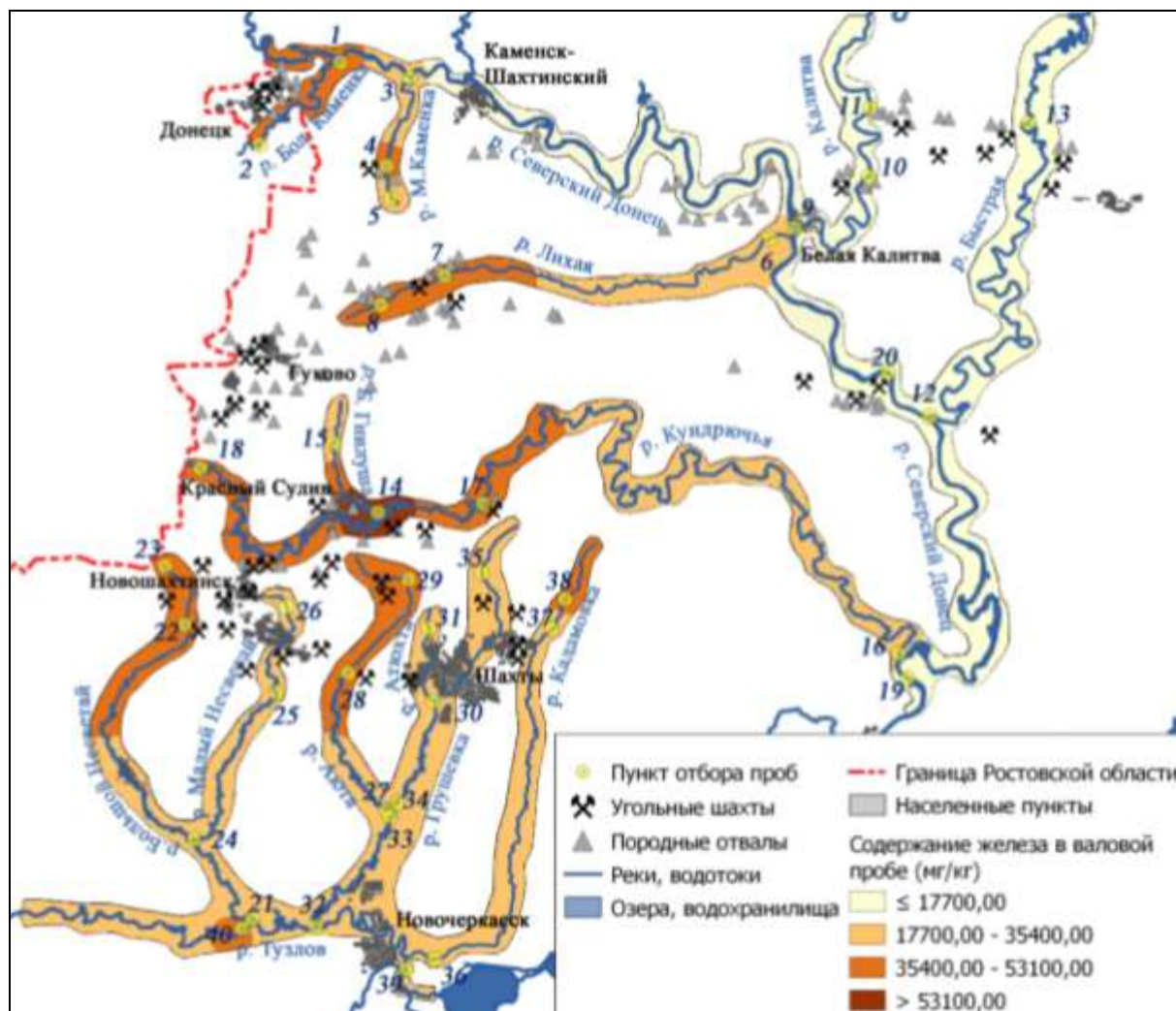


Рисунок 23 – Распределение содержания железа в донных отложениях рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Рассмотрим участки рек, где наблюдаются повышенные концентрации относительно бассейна в целом. Среди валовых проб донных отложений наибольшее содержание железа (больше кларкового в 2,4 раза) отмечено в створе 14 реки Большая Гнилуша. Повышенными значениями характеризуются также створы 1 и 2 реки Большая Каменка, створ 4 реки Малая Каменка, створы 7 и 8 реки Лихая, створы 17 и 18 реки Кундрючья (в бассейне Северского Донца); створы 22 и 23 реки Большой Несветай, 28 и 29 реки Аюта, створ 38 реки Кадамовка и створ 40 реки Тузлов (в бассейне Тузлова). Как видим из картосхемы (рисунок 23), основные створы, характеризующиеся повышенными содержаниями железа (за исключением створа 40), находятся на территориях, в большей степени подверженных воздействию угледобывающей промышленности.

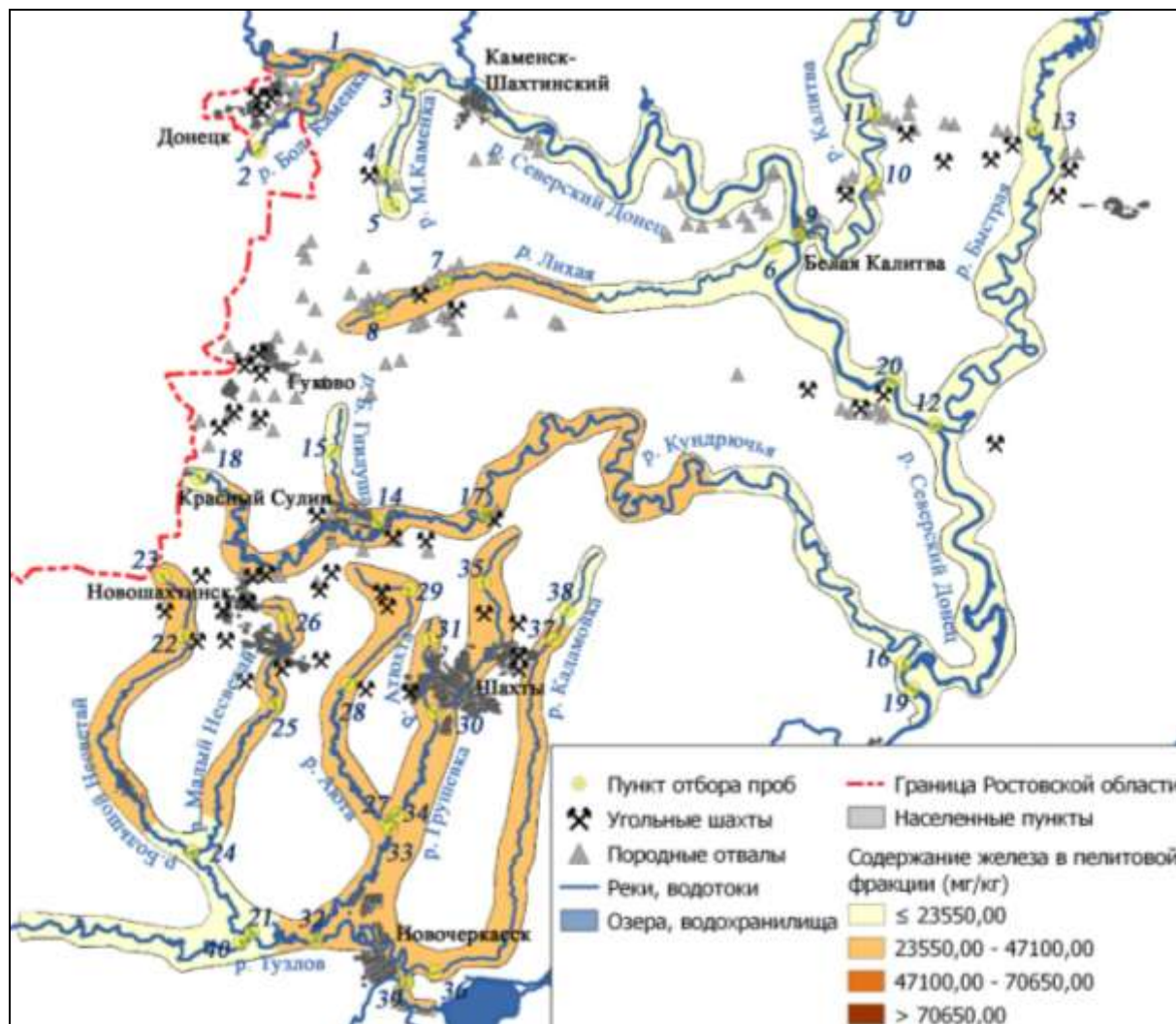


Рисунок 24 – Распределение содержания железа в пелитовой фракции донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

В пелитовой фракции в среднем содержание железа ниже, чем по валовым пробам, что видно и из рисунка 24. Здесь отчетливо выделяются 2 области: со значениями выше 23550 мг/кг (0,5 кларка) и ниже. Повышенными концентрациями железа в донных отложениях характеризуются створы реки Большая Каменка, верхний створ реки Лихая, а также практически все створы бассейна Тузлова (кроме устьевых створов рек Кадамовка, Большой и Малый Несветай и створов 34, 39 и 40, где данные по содержанию железа в пелитовой фракции отсутствуют).

Таким образом, для донных отложений рек бассейна Северского Донца в целом характерно накопление свинца и никеля в пелитовой фракции ( $Pb_{2,3} Ni_{2,1}$ ). Речные осадки бассейна Тузлова характеризуются большим перечнем элементов с аномальными содержаниями в пелитовой фракции ( $Cr_{2,3} Pb_{2,2} Ni_{1,6}$ ). Выявлено, что в осадках рек ряд элементов в отдельных случаях связан с минералами тяжелой фракции (ильменит, магнетит, гидроокислы железа). В целом, уровень загрязнения донных отложений рек бассейна Тузлова как по значениям коэффициентов концентрации, так и по числу типоморфных элементов несколько выше, чем бассейна Северского Донца, что вызвано большим уровнем воздействия угледобывающей промышленности в указанном бассейне.

#### **4.3 Интегральная оценка загрязненности донных отложений рек**

В предыдущем разделе охарактеризован химический состав донных отложений рек, рассчитаны коэффициенты концентрации металлов, по которым можно судить по уровню накопления элементов и о степени проявления техногенного воздействия на водосборы. Однако по одному или нескольким компонентам нельзя дать интегральную оценку состояния речных осадков, по этой причине для характеристики уровня загрязненности донных отложений рек Восточного Донбасса был рассчитан ИПЗ<sub>до</sub>, подробнее описанный в разделе 2.3.

Уровни загрязнённости и соответствующие им диапазоны значений ИПЗ<sub>до</sub> установлены на основе результатов оценки степени загрязнённости донных отложений и речных вод Восточного Донбасса по общепринятым показателям:  $Z_c$ , степени загрязнения Хокансона ( $C_d$ ) и УКИЗВ [87]. Результаты расчётов анализируемых показателей представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Оценка уровня загрязненности донных отложений рек и речных вод Восточного Донбасса с использованием разных показателей [96]

Река	№ створа	$Z_C$	Уровень загрязнения по $Z_C$	$C_d$	Уровень загрязнения по $C_d$	ИПЗ <sub>до</sub>	Уровень загрязненности по ИПЗ <sub>до</sub>	УКИЗВ среднего-летнего	КПЗ	Уровень загрязненности по УКИЗВ
Бассейн реки Северский Донец										
Большая Каменка	1	5,4	Слабый	11,2	Умеренный	6,5	Умеренный	5,1	4	4В Очень грязная
	2	7,5	Слабый	12,1	Умеренный	5,2	Умеренный	5,8	6	5 Экстремально грязная
Малая Каменка	3	5,2	Слабый	10,0	Умеренный	3,8	Умеренный	5,4	4	4В Очень грязная
	4	2,9	Слабый	9,6	Умеренный	6,0	Умеренный	5,7	5	5 Экстремально грязная
	5	11,9	Средний	10,2	Умеренный	7,9	Высокий	5,7	5	5 Экстремально грязная
Лихая	6	2,7	Слабый	6,8	Низкий	4,3	Умеренный	5,9	5	5 Экстремально грязная
	7	10,9	Средний	13,7	Умеренный	4,8	Умеренный	5,6	5	5 Экстремально грязная
	8	15,3	Средний	17,9	Высокий	5,7	Умеренный	5,2	4	4В Очень грязная
Калитва	9	4,1	Слабый	6,3	Низкий	4,7	Умеренный	4,5	3	4Б Грязная
	10	2,0	Слабый	4,2	Низкий	0,0	Слабый	4,2	3	4Б Грязная
	11	1,0	Слабый	6,5	Низкий	2,9	Слабый	4,3	2	4А Грязная
Быстрая	12	6,1	Слабый	5,5	Низкий	2,6	Слабый	5,6	4	4В Очень грязная
	13	1,0	Слабый	9,0	Умеренный	2,0	Слабый	4,3	2	4А Грязная
Большая Гнилуша	14	28,4	Средний	24,2	Высокий	7,9	Высокий	6,5	7	5 Экстремально грязная
	15	7,5	Слабый	10,6	Умеренный	4,5	Умеренный	6,6	8	5 Экстремально грязная
Кундрючья	16	4,1	Слабый	10,0	Умеренный	4,7	Умеренный	5,9	6	5 Экстремально грязная
	17	4,7	Слабый	12,2	Умеренный	5,4	Умеренный	6,4	7	5 Экстремально грязная
	18	6,9	Слабый	11,2	Умеренный	6,4	Умеренный	5,4	5	4Г Очень грязная
Северский Донец	19	1,0	Слабый	3,4	Низкий	0,0	Слабый	4,6	4	4Б Грязная
	20	1,0	Слабый	5,5	Низкий	3,4	Слабый	4,5	4	4Б Грязная

Река	№ створа	Z <sub>C</sub>	Уровень загрязнения по Z <sub>C</sub>	C <sub>d</sub>	Уровень загрязнения по C <sub>d</sub>	ИПЗ <sub>до</sub>	Уровень загрязненности по ИПЗ <sub>до</sub>	УКИЗВ средне-много-летний	КПЗ	Уровень загрязненности по УКИЗВ
Бассейн реки Тузлов										
Большой Несветай	21	2,6	Слабый	7,2	Низкий	7,3	Высокий	6,5	7	5 Экстремально грязная
	22	6,4	Слабый	13,0	Умеренный	4,5	Умеренный	6,1	6	5 Экстремально грязная
	23	3,6	Слабый	8,3	Умеренный	3,5	Умеренный	5,1	5	4Г Очень грязная
Малый Несветай	24	2,8	Слабый	10,5	Умеренный	4,0	Умеренный	6,4	7	5 Экстремально грязная
	25	4,5	Слабый	9,2	Умеренный	4,0	Умеренный	6,7	8	5 Экстремально грязная
	26	17,3	Средний	17,0	Высокий	3,4	Слабый	5,5	5	4Г Очень грязная
Аюта	27	3,7	Слабый	12,0	Умеренный	6,1	Умеренный	6,4	8	5 Экстремально грязная
	28	2,0	Слабый	8,8	Умеренный	4,0	Умеренный	6,5	8	5 Экстремально грязная
	29	6,9	Слабый	17,9	Высокий	9,3	Высокий	5,9	6	5 Экстремально грязная
Атюхта	30	19,5	Средний	12,3	Умеренный	5,4	Умеренный	6,7	7	5 Экстремально грязная
	31	5,4	Слабый	11,5	Умеренный	2,0	Слабый	6,2	6	5 Экстремально грязная
Грушевка	32	3,8	Слабый	15,5	Умеренный	5,3	Умеренный	6	5	5 Экстремально грязная
	33	5,6	Слабый	18,7	Высокий	6,0	Умеренный	6,3	6	5 Экстремально грязная
	34	8,2	Слабый	12,4	Умеренный	4,4	Умеренный	5,9	6	5 Экстремально грязная
	35	4,0	Слабый	10,8	Умеренный	4,1	Умеренный	6,3	7	5 Экстремально грязная
Кадамовка	36	8,8	Слабый	7,1	Низкий	0,0	Слабый	6,4	6	5 Экстремально грязная
	37	4,2	Слабый	9,3	Умеренный	5,1	Умеренный	6,5	6	5 Экстремально грязная
	38	4,6	Слабый	4,6	Низкий	0,0	Слабый	6,3	6	5 Экстремально грязная
Тузлов	39	3,9	Слабый	10,6	Умеренный	7,3	Высокий	5,7	5	5 Экстремально грязная
	40	18,5	Средний	12,2	Умеренный	6,4	Умеренный	5,8	5	5 Экстремально грязная

Речные воды по УКИЗВ в целом характеризуются более высоким уровнем загрязнения, нежели донные отложения по любому из показателей. Это вполне объяснимо, учитывая, что в пределах Восточного Донбасса речные воды подвержены вторичному загрязнению материалом донных осадков. Как показывают результаты исследований, донные отложения рек Восточного Донбасса являются источником поступления значительных количеств железа, марганца, меди и хрома в речные воды [99]. Это также подтверждается данными других исследователей, согласно которым взмучивание тонкодисперсных отложений сопровождается резким снижением качества речных вод и ростом концентрации тяжелых металлов и органического вещества в воде [63, 124].

Что касается донных отложений, то по показателю  $Z_c$  речные осадки характеризуются преимущественно слабым уровнем загрязнения, лишь для отдельных створов отмечен средний уровень загрязненности. По показателю степени загрязнения Хокансона донные осадки на большей части створов характеризуются средним уровнем загрязнения, на отдельных створах – низким или высоким.

По предлагаемому нами ИПЗ<sub>до</sub> большую часть участков рек можно классифицировать как умеренно загрязнённые. Как и в случае с суммарным показателем загрязнения, по ИПЗ<sub>до</sub> для донных отложений рек бассейна Северского Донца в целом характерен более низкий уровень загрязненности, чем для рек бассейна Тузлова [154]. Высокий уровень загрязнённости отмечен для створа 21 реки Большая Несветай, створа 29 реки Аюта и створа 39 реки Тузлов; а также для створа 5 реки Малая Каменка и створа 14 реки Большая Гнилуша. 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 с использованием ИПЗ<sub>до</sub> представлены также в виде картосхемы на рисунке 25.

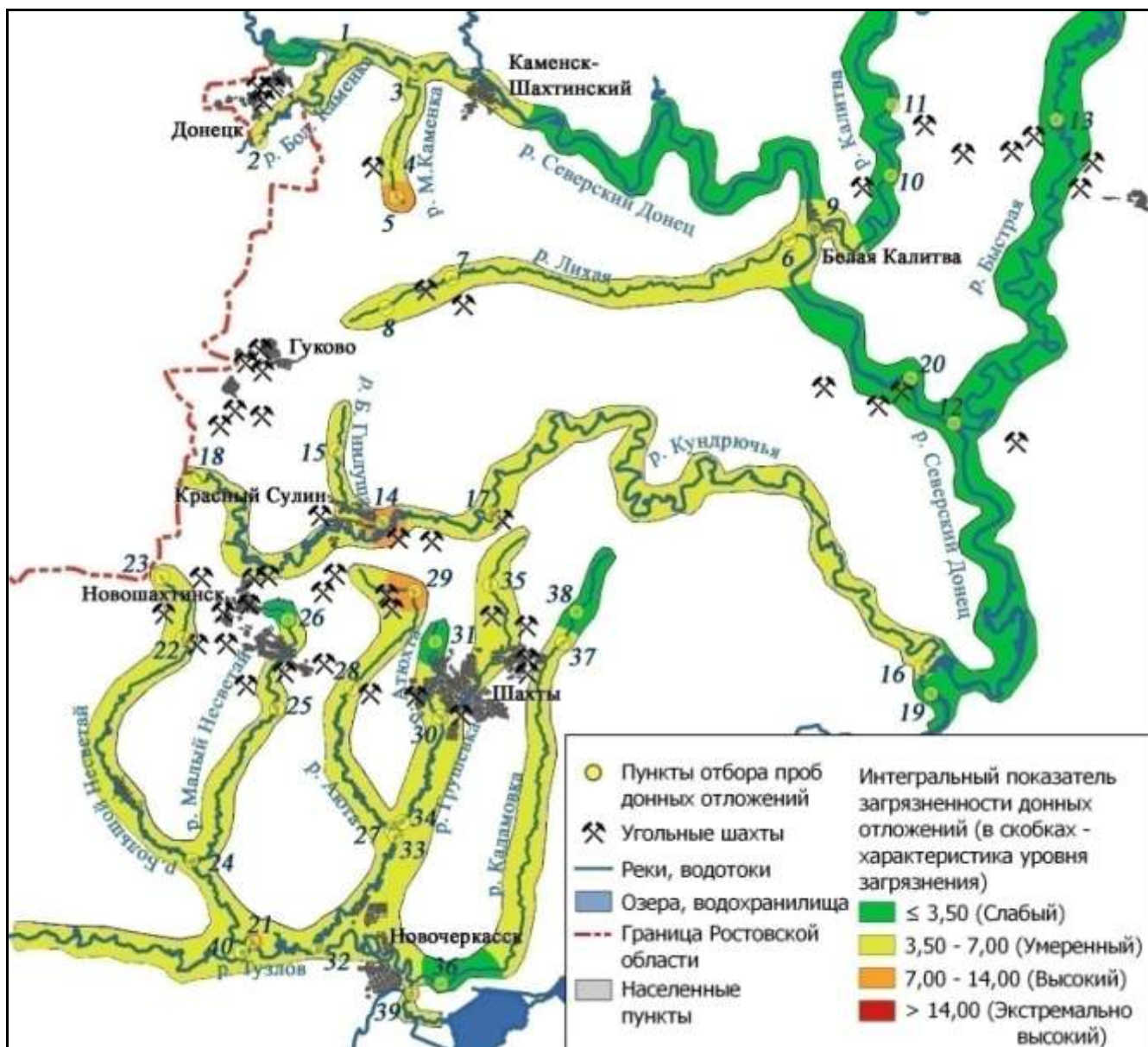


Рисунок 25 – Картограмма интегрального показателя загрязненности донных отложений (ИПЗ<sub>до</sub>) рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Отдельное внимание стоит уделить створам, в которых наблюдаются различия в оценке уровня загрязнённости донных отложений с использованием того или иного показателя. Речные осадки створов с низким выходом пелитовой фракции характеризуются более низким уровнем загрязненности по ИПЗ<sub>до</sub>, чем при оценке с использованием общепринятых показателей. При этом, как и следовало ожидать, на участках рек с аномальными содержаниями свинца (II класс опасности), по ИПЗ<sub>до</sub> донные отложения характеризуются более высоким уровнем загрязненности.

В остальных случаях результаты оценки уровня загрязнённости донных отложений с использованием ИПЗ<sub>до</sub> соотносятся с характеристикой как минимум по одному из описанных подходов, что показывает сопоставимость полученных результатов.

Как было показано ранее, по результатам корреляционного анализа среди всех рассматриваемых показателей уровень загрязненности донных осадков по ИПЗ<sub>до</sub> в большей степени соответствует уровню загрязненности речных вод по УКИЗВ, что говорит о лучших индикаторных свойствах предлагаемого нами показателя в пределах речных систем углепромышленного региона Восточного Донбасса. Однако, для того, чтобы с уверенностью говорить о его надежности и универсальности, в дальнейшем необходимо провести апробацию на донных отложениях других регионов.

Таким образом, донные отложения рек Восточного Донбасса по ИПЗ<sub>до</sub> характеризуются преимущественно умеренным уровнем загрязнения. Однако на некоторых створах сохраняется высокий уровень загрязнённости донных осадков. «Важно подчеркнуть, что ИПЗ, как правило, хорошо коррелирует с уровнем загрязненности воды, и, следовательно, обладает надёжными индикаторными свойствами» [96, с. 86].

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

Техногенные шахтные воды играют существенную роль в формировании качества поверхностной и подземной гидросферы в пределах Восточного Донбасса [11, 12, 30, 43]. По этой причине не вызывает сомнения факт влияния шахтных вод и на донные отложения рек исследуемого региона.

Прежде чем перейти к изменению химического состава донных осадков в зоне влияния шахтных вод, имеет смысл рассмотреть степень влияния угледобывающей промышленности Восточного Донбасса на содержания

основных компонентов минерального состава осадков рек. Для этой цели створы рек были сгруппированы в зависимости от расположения на три категории.

На рисунке 26 представлено распределение основных компонентов минерального состава легкой фракции донных отложений малых рек Восточного Донбасса. Как видно из этого графика, 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). Для кварца и кальцита, напротив, в створах ниже выхода техногенных шахтных вод наблюдаются минимальные содержания.

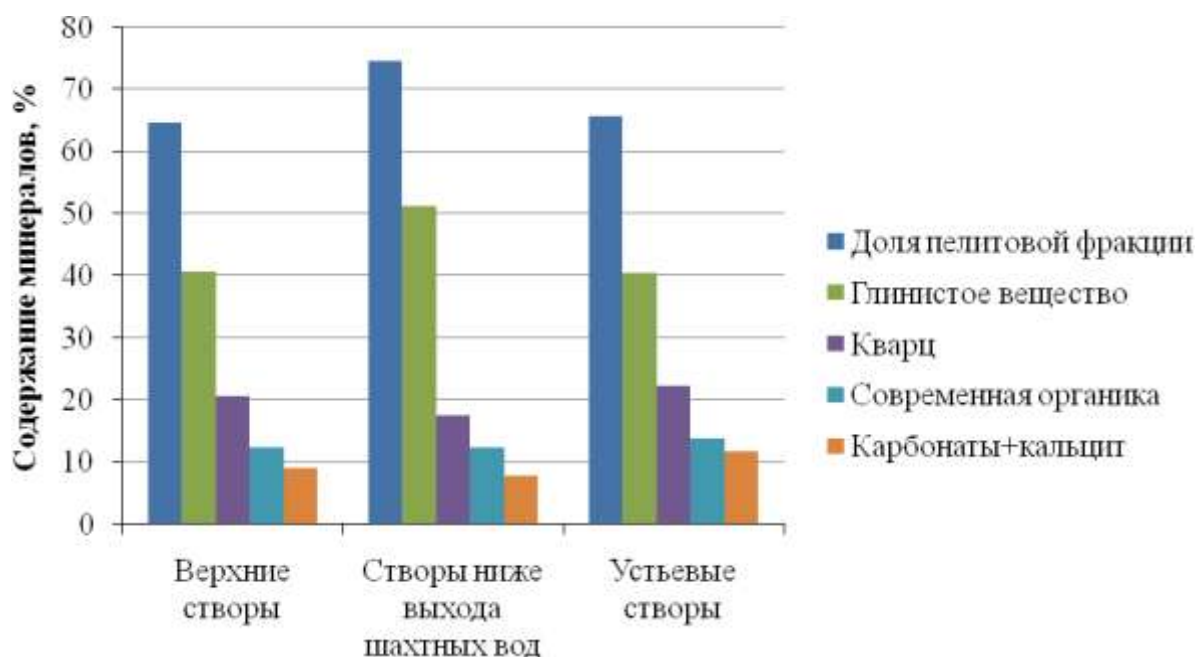


Рисунок 26 – Содержание основных минералов легкой фракции донных отложений рек в зависимости от группы створов (составлено автором)

Подобные закономерности характерны не только для исследуемых донных осадков. Как указывает Янин [125], гранулометрическими особенностями состава техногенных илов реки Пахры и Нура являются увеличенные содержания в них алевритовых и глинистых частиц. При этом наиболее заметен рост относительной доли частиц, отвечающих размерности физической глины.

Подобным образом проанализированы и содержания основных минералов тяжелой фракции. В ряде исследований [6, 59, 60, 125] отмечено, что в зонах техногенного воздействия происходят специфичные процессы минералообразования, что проявляется в изменении минерального состава тяжелой фракции – увеличении содержания аутигенных минералов.

На рисунке 27 представлена гистограмма распределения содержаний основных компонентов тяжелой фракции донных осадков изучаемых рек. Как видно из данного графика, доля основного терригенного минерала ильменита увеличивается по направлению от верхних створов к устьевым с заметным снижением тенденции в группе импактных створов. Содержания пирита, напротив, максимальны в группе верхних створов – за счет створов 8 реки Лихая и створа 40 реки Тузлов.

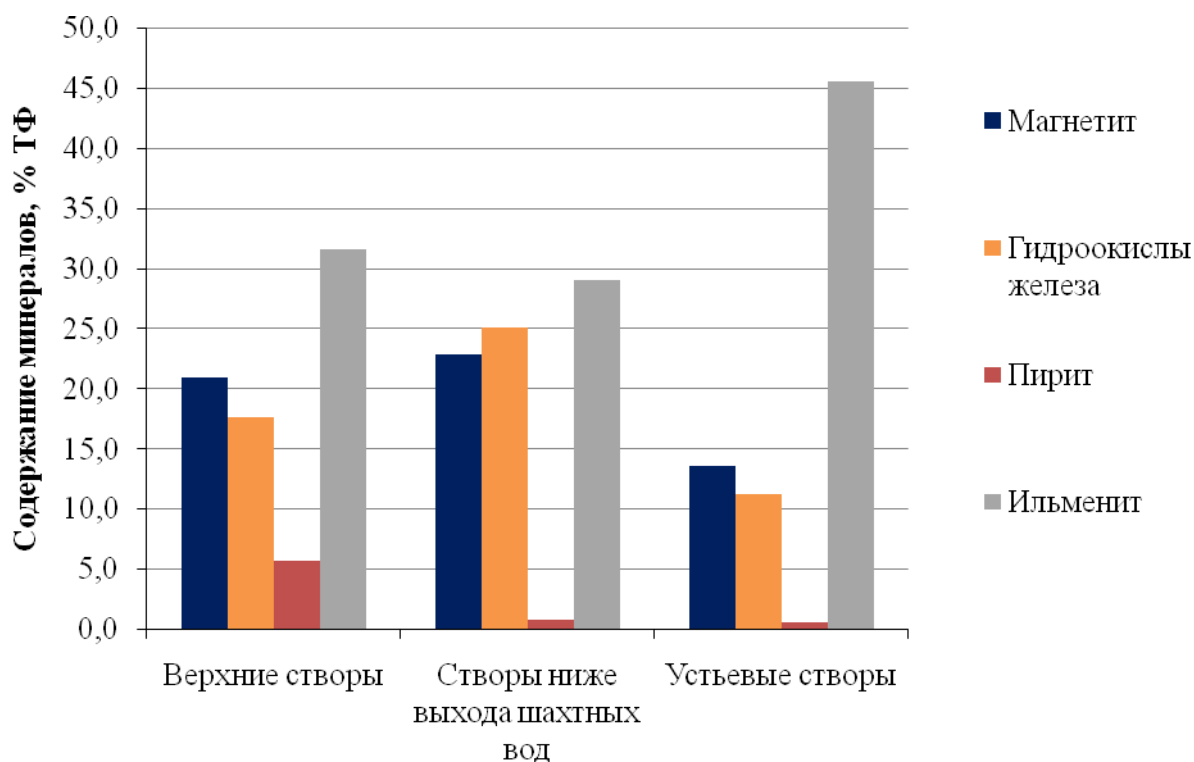


Рисунок 27 – Содержание основных минералов тяжелой фракции (ТФ) донных отложений в зависимости от группы створов (составлено автором)

При этом содержания основных аутигенных минералов – магнетита и гидроокислов железа – заметно выше в группе створов, расположенных ниже выхода шахтных вод, затем по убыванию содержаний идут верхние створы, и наименьшими значениями характеризуются осадки устьевых створов.

Подобное распределение не выглядит случайным. Как можно увидеть из схемы расположения створов наблюдений (см. рисунок 2), верховья рек в пределах исследуемого района зачастую расположены на техногенно преобразованных территориях, поблизости от крупных шахт и населенных пунктов (промышленных центров). В большей степени такое наблюдается для рек бассейна Тузлова. Кроме того, загрязняющие вещества с шахтными водами могут поступать не только с водоизливов шахт и отстойников, как этого можно было ожидать, но и с подземными водами, и в этом случае можно говорить не о точечном, а о диффузном загрязнении, которое может проявляться и выше мест сброса шахтных вод.

Если взять и рассмотреть изменения состава осадков рек, верховья которых относительно удалены от техногенно нарушенных территорий, получится более контрастная картина. Так, распределение основных минералов тяжелой фракции в донных осадках рек Кадамовка, Быстрая, Калитва, Малая Каменка и Кундрючья выглядит следующим образом (рисунок 28).

Содержания магнетита и гидроокислов железа в осадках створов, расположенных ниже выхода техногенных шахтных вод, практически в два раза выше, чем в верхних створах. В устьевых створах содержания указанных минералов еще ниже, чем в верхних створах.

Таким образом, в результате влияния шахтных вод в донных отложениях исследуемых рек наблюдаются изменения в содержании основных минералов легкой и тяжелой фракции. В составе легкой фракции происходит увеличение доли пелитовой фракции и содержания глинистых минералов, одновременно с этим снижается доля кварца в составе осадка. На распределение содержаний аутигенных минералов тяжелой фракции большое влияние оказывают гидроокислы железа, поступающие в донные осадки с техногенными шахтными

водами. Выявлено, что створы, расположенные ниже выхода техногенных шахтных вод на поверхность, характеризуются повышенными содержаниями аутигенных гидроокислов железа и магнетита. При этом содержания пирита в большей степени связаны с наличием сульфатной серы.

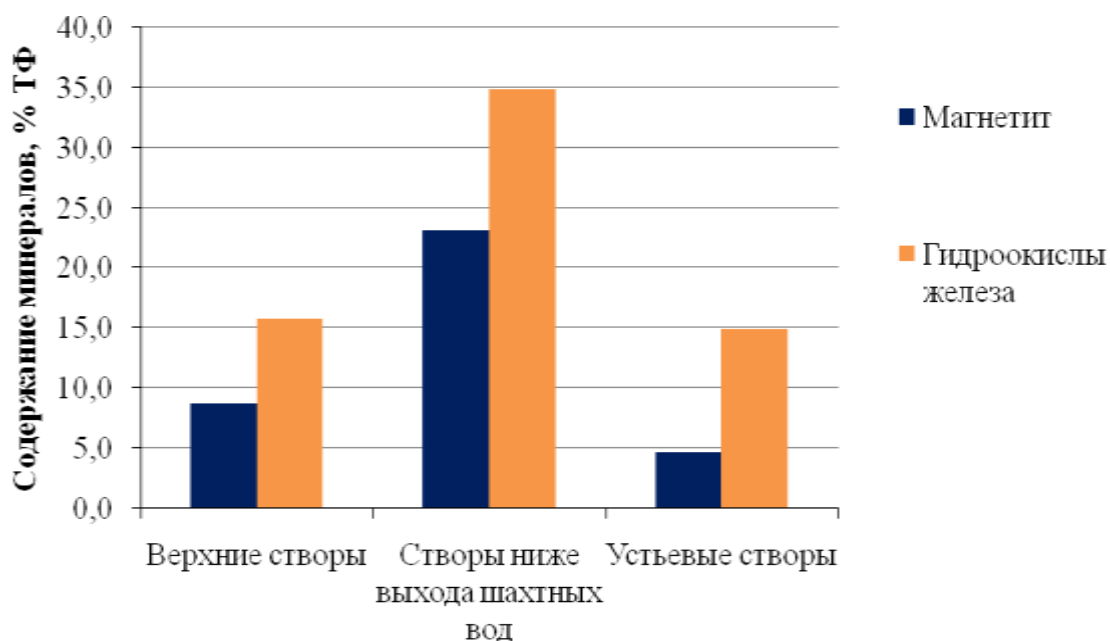


Рисунок 28 – Распределение минералов тяжелой фракции (ТФ) донных отложений рек Кадамовка, Быстрая, Калитва, Малая Каменка и Кундрючья в зависимости от группы створов (составлено автором)

Химический состав донных отложений, равно как и минералогический, также подвержен изменению в зоне воздействия шахтных вод. Как показано в работе Е.В. Гибкова с соавторами, «шахтные воды, как техногенная генетическая разновидность подземных вод, формировались в горных выработках на протяжении длительного времени за счёт окисления минералов (преимущественно сульфидов), связанных с углями и вмещающими породами» [19, с. 82]. Поэтому и химический состав таких вод отличается высокой минерализацией, преимущественно кислой, реже – нейтральной реакцией среды, преобладанием сульфат-ионов в составе. Так, согласно работе [74], подавляющее большинство шахт (86 %) имеет воды сульфатного класса группы натрия.

В исследованиях А.И. Гавришина [10, 14] показано, что в местах сброса шахтных вод происходит изменение состава поверхностных вод. Содержание Fe увеличивается в десятки раз, отмечается повышенное содержание Mn, Al, Cu и других компонентов. Все это указывает на то, что и макро-, и микроэлементный состав формируется во многом за счет влияния техногенных шахтных вод.

Схожим образом поступающие в речную сеть шахтные воды воздействуют на химический состав донных отложений изучаемых рек. «Донные осадки створов, расположенных ниже сброса техногенных шахтных вод ... характеризуются наибольшими содержаниями железа, как в валовой пробе, так и в пелитовой фракции. Причем наибольший эффект воздействия зафиксирован уже в непосредственной близости от источника. Он еще прослеживается на расстоянии 500 м и исчезает в устьевых створах, расположенных в 20-40 км от мест поступления в речную сеть техногенных шахтных вод» [37, с. 94]. Во многих случаях такая закономерность прослеживается и для остальных элементов, наиболее типичных для шахтных вод региона.

По данным исследования [19], к типоморфным микроэлементам шахтных вод исследуемого района относятся Fe, Mn, Sr, Li, распространенные повсеместно и характеризующиеся высокими концентрациями. Как показано в работе Г.Ю. Скляренко с соавторами, «в микроэлементном составе речных вод явно доминируют Sr, Fe, Al и Mn, в меньшей степени – Li» [105, с. 102]. Тем самым, «состав компонентов шахтных вод в значительной степени соответствует набору приоритетных загрязняющих веществ в подземных и речных водах региона» [105, с. 103]. Очевидно, что как для речных и шахтных вод, так и для донных отложений, железо и марганец во многом определяют геохимическую специализацию, в отдельных случаях высокими содержаниями характеризуются Sr и Li. В остальном различия в содержаниях элементов в средах будут зависеть еще и от физико-химических свойств элементов.

В таблице 21 представлены данные о содержании тяжелых металлов сбрасываемых техногенных шахтных вод основных угольных шахт Восточного Донбасса (усредненные значения в период с 2010 по 2014 годы). Обращает свое

внимание, что по абсолютным содержаниям в химическом составе шахтных вод превалирует железо, затем марганец, а содержания остальных элементов на порядок ниже. Аналогичная закономерность отмечалась и при описании химического состава донных отложений. Стоит также сказать о том, что в составе техногенных вод шахт «Юбилейная», № 15 ШУ «Несветаевское», № 408 ШУ «Лиховское» содержание марганца превышает содержание железа, в остальных рассмотренных объектах сохраняется описанная закономерность.

Таблица 21 – Химический состав шахтных вод в пределах Восточного Донбасса (составлено автором)

Объект (шахта, ШУ)	Содержание элементов, мг/дм <sup>3</sup>						
	Fe <sub>общ</sub>	Mn	Co	Cu	Ni	Pb	Zn
Бассейн Тузлова							
Шахта им. Красина	35,3	3,4	0,008	0,004	0,017	0,008	0,024
«Глубокая»	67,4	7,3	0,013	0,037	0,021	0,013	0,468
«Наклонная»	5,4	2,4	0,003	0,007	0,012	0,005	0,033
«Юбилейная»	2,9	3,7	0,014	0,010	0,013	0,002	0,016
Шахта им. Кирова	43,8	9,5	0,022	0,004	0,028	0,010	0,012
№15 ШУ «Несветаевское»	9,5	16,1	0,052	0,007	0,071	0,006	0,046
Среднее по бассейну	27,4	7,1	0,018	0,011	0,027	0,007	0,100
Бассейн Северского Донца							
«Восточная»	18,7	3,3	0,002	0,004	0,007	0,007	0,013
«Тацинская»	30,5	2,7	0,004	0,004	0,006	0,004	0,010
ШУ «Краснодонское»	155,3	11,9	0,144	0,004	0,270	0,015	0,143
«Комиссаровская»	426,8	29,2	0,016	0,002	0,062	0,015	0,013
«Бургуста-Замковая-2»	143,9	6,9	0,015	0,005	0,030	0,004	0,143
№408 ШУ «Лиховское»	7,0	10,6	0,050	0,002	0,099	0,005	0,082
Среднее по бассейну	130,4	10,8	0,038	0,003	0,079	0,008	0,067

Несмотря на тот факт, что в среднем концентрации металлов выше в шахтных водах бассейна Северского Донца, большее воздействие оказывается именно на речные водосборы бассейна Тузлова. Во многом средние содержания элементов шахтных вод бассейна Северского Донца завышены за счет сбрасываемых вод шахты «Комиссаровская», где, как показано в работе [147], наблюдаются наибольшие концентрации тяжелых металлов. По данным исследований [14, 33], объем выноса растворенных веществ с шахтными водами в

бассейне Северского Донца значительно ниже. В большей степени подобному влиянию, по данным А.И. Гавришина [14] подвержены реки Лихая и Кундрючья в бассейне Северского Донца, Грушевка и Кадамовка в бассейне Тузлова. При этом наибольший объем поступления растворенных веществ наблюдается для реки Грушевка (167 тыс. т/год).

Для выявления типоморфных элементов шахтных вод были рассчитаны коэффициенты концентрации элементов относительно кларков подземных вод лесостепных ландшафтов умеренно влажного климата [117]. В таблице 22 представлены ассоциации типоморфных элементов шахтных вод в порядке уменьшения значений  $K_C$ .

Таблица 22 – Характеристика ассоциаций элементов шахтных вод Восточного Донбасса (составлено автором)

Объект (шахта, ШУ)	Формула геохимической ассоциации
Бассейн Тузлова	
Шахта им. Красина	$Mn_{79,0} Fe_{74,2} Ni_{14,2} Co_{13,4} Pb_{7,1} Cu_{1,5}$
«Глубокая»	$Mn_{172,1} Fe_{141,6} Co_{20,7} Ni_{17,2} Zn_{14,3} Cu_{13,2} Pb_{11,6}$
«Наклонная»	$Mn_{56,5} Fe_{11,3} Ni_{9,6} Pb_{4,3} Co_{4,1} Cu_{2,5}$
«Юбилейная»	$Mn_{86,8} Co_{21,9} Ni_{10,4} Fe_{6,2} Cu_{3,5} Pb_{1,7}$
Шахта им. Кирова	$Mn_{221,9} Fe_{92,9} Co_{35,7} Ni_{23,4} Pb_{8,2}$
№15 ШУ «Несветаевское»	$Mn_{376,8} Co_{83,1} Ni_{59,0} Fe_{19,9} Pb_{5,0} Cu_{2,3}$
Среднее по бассейну	$Mn_{165,5} Fe_{57,5} Co_{29,8} Ni_{22,3} Pb_{6,3} Cu_{4,0} Zn_{3,0}$
Бассейн Северского Донца	
«Восточная»	$Mn_{76,3} Fe_{39,3} Ni_{5,8} Pb_{5,7} Co_{2,5} Cu_{1,5}$
«Тацинская»	$Fe_{64,1} Mn_{62,3} Co_{5,6} Ni_{5,2} Pb_{3,3}$
ШУ «Краснодонское»	$Fe_{326,2} Mn_{278,2} Co_{232,4} Ni_{225,2} Pb_{13,1} Zn_{4,4}$
«Комиссаровская»	$Fe_{896,7} Mn_{684,8} Ni_{52,0} Co_{25,9} Pb_{13,1}$
«Бургуста-Замковая-2»	$Fe_{302,4} Mn_{162,6} Ni_{25,1} Co_{23,5} Zn_{4,4} Pb_{3,7} Cu_{1,6}$
№408 ШУ «Лиховское»	$Mn_{250,0} Ni_{82,6} Co_{80,9} Fe_{14,7} Pb_{4,3} Zn_{2,5}$
Среднее по бассейну	$Fe_{273,9} Mn_{252,4} Ni_{66,0} Co_{61,8} Pb_{7,2} Zn_{2,1}$

Обращает на себя внимание, что для шахтных вод в пределах бассейна Тузлова наибольшими коэффициентами концентрации характеризуется Mn, после

него идут Fe, Co, Ni и остальные элементы. В структуре геохимической ассоциации шахтных вод бассейна Северского Донца первое место по величине  $K_C$  занимает железо в большинстве случаев, затем также идут Mn и остальные металлы. В шахтных водах обоих бассейнов практически все элементы в аномальных содержаниях, лишь в отдельных случаях в геохимическую ассоциацию не входят Cu или Zn.

При сравнении ассоциаций элементов шахтных вод, рассчитанных в среднем по бассейну, можно отметить, что, несмотря на большие объемы выноса загрязняющих веществ в бассейне Тузлова, концентрации железа, марганца, кобальта, свинца и никеля значительно выше именно в шахтных водах бассейна Северского Донца, цинка и меди – в бассейне Тузлова. Наибольший вклад в такое распределение вносят сравнительно высокие концентрации элементов техногенных вод шахты «Коммисаровская», где отмечаются наибольшие содержания Fe и Mn. Наибольшие концентрации Co, Ni и Pb наблюдаются в шахтных водах ШУ «Краснодонецкое», Cu и Zn – техногенных водах шахты «Глубокая».

Как показано в разделе 4.1, для донных отложений рек Восточного Донбасса ассоциации типоморфных элементов состоят из тех же самых металлов, которые встречаются в аномальных содержаниях в шахтных водах. Пелитовая фракция донных отложений рек бассейна Северского Донца в основном характеризуется аномальными содержаниями Pb, Ni, в отдельных створах к ним добавляются Mn, Zn, Co, Cu. Валовые пробы, как правило, характеризуются большим набором элементов с аномальными содержаниями: Cr и Zn – наиболее часто, Ni, Co, Pb, Mn, Cu, Fe – в отдельных створах.

Похожая картина наблюдается и для донных отложений рек бассейна Тузлова. В пелитовой фракции осадков аномальными содержаниями наиболее часто характеризуются Cr, Pb, Ni, в отдельных створах – Mn, Zn, Cu. В валовых пробах в аномальных содержаниях представлены наиболее часто Zn, Cr, Ni, Pb, Mn, в отдельных створах – Co и Cu.

Для определения набора типоморфных элементов донных отложений рек в зоне влияния техногенных шахтных вод были рассчитаны коэффициенты концентрации элементов в нижних створах, где в качестве фонового параметра использованы содержания элементов в верхних створах. При этом для расчетов брались именно содержания в валовых пробах. В таблице 23 представлены ассоциации типоморфных элементов в отложениях нижних створов по рекам.

Таблица 23 – Геохимические ассоциации элементов донных отложений створов, подверженных влиянию техногенных шахтных вод (составлено автором)

Река	Ассоциация типоморфных элементов
Малая Каменка	Mn <sub>1,7</sub>
Лихая	Mn <sub>1,7</sub>
Калитва	Cr <sub>5,0</sub>
Большая Гнилуша	Mn <sub>3,9</sub> Cu <sub>3,5</sub> Pb <sub>2,8</sub> Cr <sub>2,7</sub> Fe <sub>2,6</sub> Co <sub>2,3</sub> Ni <sub>2,0</sub> Zn <sub>2,0</sub>
Кундрючья	Cr <sub>2,0</sub>
Большой Несветай	Mn <sub>4,1</sub> Zn <sub>1,6</sub>
Малый Несветай	Cr <sub>5,0</sub> Cu <sub>2,3</sub> Fe <sub>1,8</sub> Pb <sub>1,7</sub>
Аюта	-
Кадамовка	Cr <sub>2,0</sub>

Наиболее полным набором элементов характеризуются донные отложения реки Гнилуши (8 элементов). Для большей части рек наблюдается прирост содержаний марганца и хрома в осадках нижних створов, содержания Fe, Cu, Zn, Pb – в двух из представленных рек.

За исключением Cr, содержания которого в шахтных водах ниже предела обнаружения, все металлы встречаются в аномальных содержаниях как в шахтных водах, так и в донных отложениях. 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 29). Поэтому шахтные воды следует считать одним из основных источников поступления металлов в речные воды и донные отложения.

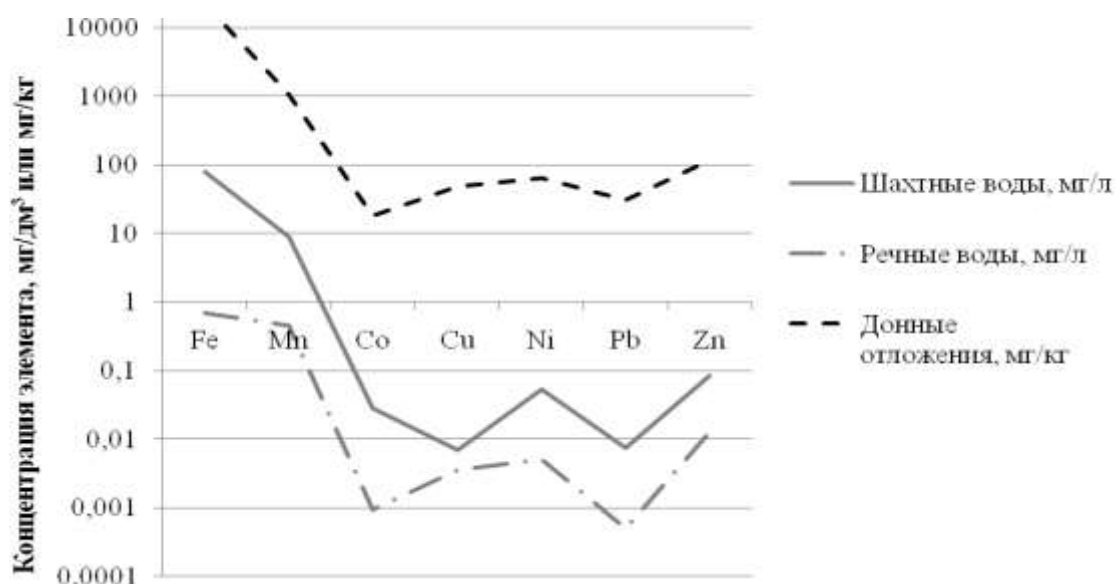


Рисунок 29 – Геохимические спектры шахтных вод, речных вод и донных отложений рек Восточного Донбасса (составлено автором)

Еще одним доказательством влияния техногенных шахтных вод на уровень загрязнения донных отложения является его изменение по направлению от верхнего створа к нижнему (таблица 24). В целом, нижние створы характеризуются более высокими значениями ИПЗ<sub>до</sub>, в некоторых случаях происходит смена уровня загрязненности со слабого на умеренный (реки Кадамовка, Малый Несветай, Атюхта) или с умеренного на высокий (реки Большая Гнилуша, Тузлов), что можно увидеть и в таблице 20. В процентном соотношении наибольшая разница в уровнях загрязненности между верхним и нижним створом наблюдается для реки Большая Гнилуша в бассейне Северского Донца (+76 %) и рек Атюхта (+165 %) в бассейне Тузлова. Отдельно стоит отметить реку Кадамовка, в осадках верхнего створа которого не встречаются элементы в аномальных концентрациях, поэтому значение ИПЗ<sub>до</sub> изменяется с 0,0 в верхнем створе до 5,1 в нижнем створе, что уже соответствует умеренному уровню загрязнения.

Также необходимо упомянуть осадки рек Малая Каменка, Лихая и Аюта, где не наблюдается прироста уровня загрязненности в нижних створах по сравнению с верхними. Осадки верхнего створа реки Лихая характеризуются

большими содержаниями Pb, Zn и Mn, меньшими – Ni и Co, разница в итоговой оценке возникает во многом за счет коэффициента токсичности Pb. Схожая ситуация характерна для осадков реки Малая Каменка. Осадки верхнего створа реки Аюта же характеризуются существенно большими содержаниями Pb, Zn и Cr, по этой причине и итоговая оценка различается практически на 60 %. Данные по этим створам указывают на то, что в водосборах этих рек, в верховьях существуют иные источники поступления металлов в речные воды.

Таблица 24 – Относительная изменчивость значений ИПЗ<sub>до</sub> под воздействием шахтных вод (составлено автором)

Река	Изменение значения ИПЗ <sub>до</sub> от верхних створов к нижним
Бассейн р. Северский Донец	
Малая Каменка	-24 %
Лихая	-17 %
Бол. Гнилуша	+ 76 %
Кундрючья	+38 %
Бассейн р. Тузлов	
Большой Несветай	+ 27 %
Малый Несветай	+18 %
Атюхта	+165 %
Аюта	- 57 %
Кадамовка	+500 %

Таким образом, шахтные воды Восточного Донбасса характеризуются широким набором металлов с аномальными содержаниями [42]. Попадая в речную сеть, ряд элементов продолжает миграцию в поверхностных водах, но и значительная часть из них 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

Для полной характеристики донных отложений рек как источника вторичного загрязнения речных вод необходимо располагать сведениями о суммарном количестве всех загрязняющих веществ, находящихся в речных осадках. Кроме того, не менее важным будет знать о доле элементов, потенциально доступных для перехода в водную толщу.

За основу метода расчета накопленной массы элементов в донных отложениях рек Восточного Донбасса взята разработка исследователей [3], однако в формулу (9) расчета была добавлена мощность слоя донных осадков:

$$Q = b \cdot h \cdot \rho_{\text{до}} \int_{L_1}^{L_2} c(l) dl, \quad (9)$$

где  $Q$  – накопленная масса элемента на участке реки;  $b$  – усредненная ширина русла реки, м;  $L$  – расстояние между двумя створами, км;  $h$  – усредненная мощность слоя донных отложений, м;  $\rho_{\text{до}}$  – усредненное значение плотности донных отложений, г/см<sup>3</sup>,  $c(l)$  – математическое уравнение зависимости концентрации элемента (мг/кг) от протяженного участка реки.

Исследуемые реки были разбиты на участки между створами отбора проб донных отложений. Длины этих участков, а также ширина русел рек в створах находились при помощи системы «Яндекс. Карты». В качестве значения концентрации элемента на участке взяты средние значения по створам, ограничивающим участок. Плотность донных отложений определялась расчетным путем на основе справочных данных о плотности осадочных пород [32].

В качестве усредненной мощности слоя донных отложений была взята величина 10 см, или 0,10 м. «Предполагается, что именно в этом диапазоне вещество донного осадка, содержащие тяжелые металлы будут наиболее активно взаимодействовать с водной толщей, следовательно, и этот слой нужно оценивать с позиции источника загрязнения вод» [32, с. 267].

Результаты расчетов по участкам рек приведены на массу пелитовой фракции, а затем просуммированы по рекам, для удобства также приведены к

виду кг/км, чтобы показать специфику накопления элементов в донных отложениях различных рек. Результаты расчетов представлены в таблице 25 и 26.

Таблица 25 – Накопленная масса элемента в донных отложениях рек бассейна р. Тузлов, кг/км (составлено автором)

Река	Накопленная масса элемента в реке, кг/км							
	Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Большой Несветай	67,42	0,04	2,68	0,17	0,12	0,06	0,24	0,36
Малый Несветай	80,34	0,05	2,97	0,20	0,15	0,07	0,29	0,38
Аюта	9,26	0,00	0,32	0,02	0,02	0,01	0,03	0,05
Атюхта	7,70	0,00	0,18	0,01	0,01	0,01	0,03	0,06
Грушевка	51,51	0,03	2,14	0,11	0,09	0,05	0,18	0,33
Кадамовка	35,93	0,02	1,45	0,08	0,06	0,03	0,13	0,21
Тузлов	217,29	0,11	7,24	0,48	0,39	0,21	0,79	1,18
Среднее по бассейну	67,07	0,04	2,43	0,15	0,12	0,06	0,24	0,37

Таблица 26 – Накопленная масса элемента в донных отложениях рек бассейна р. Северский Донец, кг/км м (составлено автором)

Река	Накопленная масса элемента в реке, кг/км							
	Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Калитва	16,62	0,02	0,78	0,03	0,04	0,03	0,09	0,06
Быстрая	13,18	0,01	0,54	0,03	0,03	0,02	0,07	0,05
Кундрючья	69,02	0,07	2,47	0,13	0,16	0,10	0,36	0,28
Большая Каменка	112,82	0,11	5,68	0,24	0,31	0,19	0,62	0,42
Малая Каменка	19,46	0,02	0,97	0,04	0,05	0,03	0,11	0,07
Лихая	58,10	0,06	2,51	0,12	0,14	0,09	0,31	0,23
Большая Гнилуша	41,63	0,04	2,08	0,09	0,11	0,07	0,23	0,16
Среднее по бассейну	47,26	0,05	2,15	0,10	0,12	0,08	0,25	0,18

В целом, запасы элементов в донных отложениях рек распределяются так же, как и их концентрации: наибольшие значения характерны для железа, марганца, для остальных – на порядок ниже. Для донных отложений рек бассейна Тузлова значения накопленной массы железа, марганца, меди и хрома выше, чем для бассейна Северского Донца; содержания цинка и никеля, в целом, сопоставимы; кобальта и свинца – ниже [32; 94].

Среди рек бассейна Тузлова наибольшими накопленной массой характеризуются донные отложения рек Тузлов и Малый Несветай, наименьшими – Аюта и Атюхта. В пределах бассейна Северского Донца наибольшая накопленная масса всех элементов, кроме хрома, наблюдается в донных отложениях рек Большая Каменка. Повышенные значения отмечены для осадков рек Кундрючья и Лихая.

Учитывая, что в бассейне Северского Донца с точки зрения загрязненности донных отложений река Большая Каменка не выделяется наибольшими концентрациями элементов, становится очевидным, что полученный результат в значительной степени зависит и от морфометрических параметров водотока, прежде всего, от ширины русла.

Для оценки роли донных отложений как источника вторичного загрязнения водной среды сотрудниками кафедры геоэкологии и прикладной геохимии в рамках выполнения гранта РФФИ № 14-17-00376 проведена серия лабораторных экспериментов по изучению взаимодействия речных вод и донных отложений рек бассейна Тузлова [99]. Имитация взаимодействия донных осадков с природными речными водами различной минерализации позволила выявить поведение ряда металлов (железа, марганца, меди, цинка и хрома) в системе «донные отложения – речная вода». Оказалось, что большая часть из них (железо, медь, хром и особенно марганец) поступает в существенных количествах из донных отложений в водную среду достаточно быстро, в первые 10, реже – 60 минут взаимодействия. Более длительный контакт заметного влияния на поведение этих металлов не оказывает.

Расчет коэффициента распределения [97, 146] позволил установить, что для Mn, Li и Sr в большей степени характерна десорбция из донных отложений в речную воду, для Cu и Zn отмечена средняя интенсивность десорбции. Fe и Cr, напротив, наиболее интенсивно сорбируются осадками из водной толщи.

Основываясь на данных эксперимента, для рек бассейнов Тузлова была рассчитана масса элемента, которая потенциально, при определенных условиях, способна переходить в водную толщу. Результаты представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Масса элемента, доступная для перехода из донных отложений в речную воду бассейна Тузлова, мг/км (составлено автором)

Река	Масса элемента, потенциально доступная для перехода в речную воду, мг/км				
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
Большой Несветай	3704,5	60609,6	184,5	1205,5	44,4
Малый Несветай	4414,0	67140,2	227,1	1450,2	46,8
Аюта	509,0	7152,4	23,4	168,2	6,1
Атюхта	423,2	4106,0	10,7	142,6	7,1
Грушевка	2830,5	48396,0	126,7	913,3	40,7
Кадамовка	1974,1	32707,8	93,1	640,4	25,9
Тузлов	11939,1	163796,4	527,9	3949,7	146,9

С учетом различия природно-климатических особенностей и уровня техногенной нагрузки на реки двух бассейнов, проведена серия аналогичных лабораторных экспериментов по изучению взаимодействия речных вод и донных отложений для рек бассейна Северского Донца. Эти работы являются логичным продолжением вышеописанных исследований и были выполнены под руководством В.Е. Закруткина в рамках гранта РФФИ №22-27-00305, в котором автор принимал активное участие на этапах отбора и камеральной подготовки проб воды и донных отложений, анализа данных и обобщения результатов исследования. Аналитические определения выполнены в научно-испытательной лаборатории «Биогеохимия» Академии биологии и биотехнологии ЮФУ на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915 под руководством С.Н. Горбова.

Пробы воды отобраны в створах с низкой (устьевой створ реки Малая Каменка) и с высокой (верхний створ реки Большая Гнилуша) минерализацией по бассейну. Тем самым, в эксперименте использованы два образца речной воды, позволяющие охарактеризовать различные условия, существующие в пределах бассейна.

Проба донных отложений была единой для эксперимента и отбиралась на верхнем створе реки Большая Гнилуша. По нашим многолетним наблюдениям, донные отложения на данном участке реки характеризуются умеренным уровнем загрязненности по предлагаемому нами интегральному показателю

загрязненности донных отложений, и слабым – по показателю  $Z_C$ , что является типичным для большей части створов рек бассейна Северского Донца. С точки зрения минерального состава, основная часть осадка представлена пелитовой фракцией (91 %), характерно высокое содержание глинистых минералов (53 %), органического вещества (15 %) и кальцитов (14 %). Среди акцессорных минералов преобладают ильменит (39 % ТФ), магнетит (33 % ТФ) и гидроокислы железа (20 %).

Отбор проб воды и донных отложений для лабораторного эксперимента по изучению процессов в системе «донные отложения – вода» выполнялся в соответствии с ГОСТ 31861-2012 и ГОСТ 17.15.01-80 соответственно [21, 22]. Пробы воды отбирались из поверхностного слоя (до 0,5 м), донные отложения – с верхнего горизонта 0–10 см. Опробование проводилось в сентябре 2023 г.

Для изучения процессов, происходящих на границе раздела фаз между водной средой и донными отложениями, проведен лабораторный эксперимент, имитирующий механическое взаимодействие фаз. Сначала были проанализированы исходные образцы речных вод (на содержание макро- и микрокомпонентов) и донных отложений (на определение содержания металлов в валовой пробе и силикатный анализ). Далее были подготовлены системы «донные отложения – вода» в соотношении 1:10 для исследования в лабораторном эксперименте в двух комбинациях:

- 1) речная вода 1 (Малая Каменка (МК)) – донные отложения;
- 2) речная вода 2 (Большая Гнилуша (БГ)) – донные отложения.

В ходе эксперимента подготовленные системы (смеси) подвергались механическому перемешиванию на шейкере в течение 10 мин, 1 и 6 ч для обеспечения разного времени контакта воды с донными отложениями. После перемешивания растворы отстаивались в течение 24 ч и фильтровались через фильтр «синяя лента». Полученные растворы (экстракты) анализировались на содержание растворенных форм ТМ.

Растворенные формы Fe, Mn, Cr, Cu и Zn в природной воде определялись атомно-абсорбционным методом. Содержание металлов в донных отложениях определяли рентгенофлуоресцентным методом анализа.

Результаты данного эксперимента показали, что по направленности процессов сорбции-десорбции на границе раздела фаз «донные отложения – вода» исследуемые металлы можно разделить на две группы.

Первая группа металлов (Mn, Cu, Zn) характеризуется десорбцией соединений металлов из донных отложений в раствор, достижением наибольшей концентрации металла в воде через 10 мин или 1 ч с последующим установлением равновесной концентрации металла со временем (рисунок 30). Fe и Cr объединены во вторую группу металлов, концентрации которых в водном растворе в ходе эксперимента остаются практически постоянными или снижаются.

На основе данных эксперимента, для рек бассейнов Северского Донца была рассчитана масса элемента, которая потенциально, при определенных условиях, способна переходить в водную толщу. Результаты представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Масса элемента, доступная для перехода из донных отложений в речную воду бассейна Северского Донца, мг/км (составлено автором)

Река	Масса элемента, потенциально доступная для перехода в речную воду, мг/км				
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
Калитва	36,8	15653,2	29,7	265,8	59,4
Быстрая	29,2	10854,4	23,1	207,0	48,8
Кундрючья	152,9	49337,1	109,3	1068,8	265,8
Большая Каменка	250,0	113661,9	203,3	1823,3	395,2
Малая Каменка	43,1	19381,1	35,0	313,9	68,4
Лихая	128,7	50222,8	102,9	918,2	212,4
Большая Гнилуша	92,3	41620,5	75,0	672,0	146,2

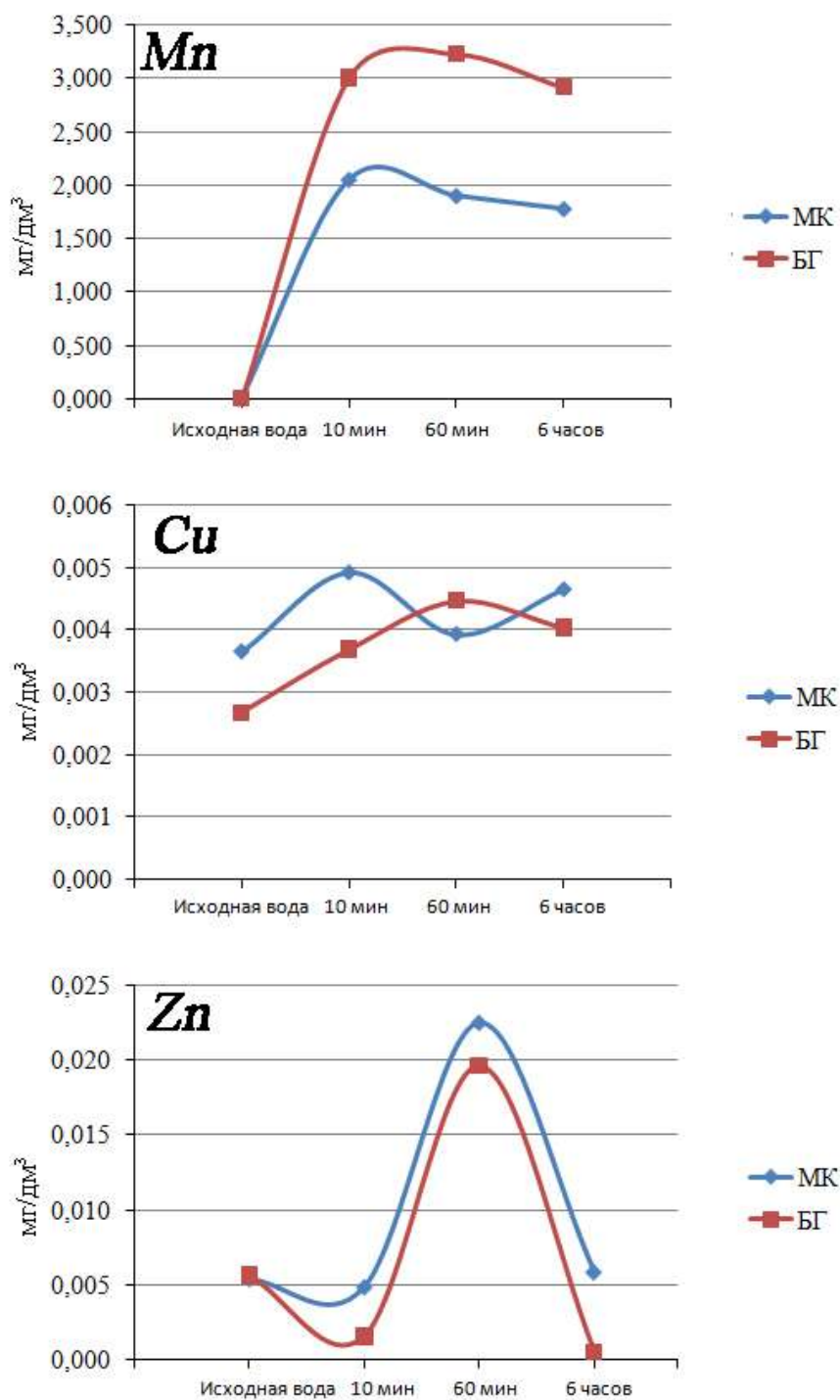


Рисунок 30 – Изменчивость содержания соединений Mn, Cu, и Zn в речной воде до и после эксперимента (составлено автором)

С помощью данных о массе элементов, которые являются потенциально доступными для перехода в водную толщу, можно оценить степень потенциальной опасности вторичного загрязнения рек Восточного Донбасса. В

бассейне Тузлова наиболее неблагоприятная обстановка характерна для рек Тузлов, Большой и Малый Несветай (таблица 27). Среди этих рек Тузлов характеризуется большими значениями накопленных масс элементов в донных отложениях. При этом в отдельных створах, где выход пелитовой фракции составляет 87-90 % (таблица 9), опасность вторичного загрязнения будет наибольшей – устьевой створ реки Малая Каменка, нижний створ реки Большой Несветай и верхний створ реки Тузлов.

В бассейне Северского Донца наблюдается более неоднородная картина. Здесь можно выделить реку Большая Каменка, для которой наблюдаются наибольшие значения накопленных масс элементов в осадках. Реки Лихая, Кундрючья и Большая Гнилуша характеризуются сопоставимыми значениями накопленных масс, однако для реки Кундрючья на ряде участков характерен высокий расход воды (таблица 28). Водность реки во многом определяет характер осадконакопления – для рек с низким расходом воды, как правило, характерны в значительной степени пелитовые осадки. Однако, благодаря морфометрическим особенностям реки Кундрючья (высокая извилистость, зарегулированность и т.п.) здесь также формируются условия, способствующие накоплению пелитовой фракции и возникновению процессов вторичного загрязнения. Среди створов в бассейне Северского Донца стоит выделить верхний створ реки Большая Каменка, верхний и нижний створы реки Лихая и Большая Гнилуша, а также верхний створ реки Кундрючья, где доля пелитовой фракции в осадке изменяется от 80 до 93 % (таблица 8).

Реки Малая Каменка, Калитва и Быстрая, хоть и значительно отличаются по водности, характеризуются низкими значениями накопленных масс металлов в донных отложениях, благодаря чему ситуацию в этих реках можно охарактеризовать как наиболее благоприятную в данном бассейне в контексте вторичного загрязнения речных вод.

Таким образом, расчет накопленной массы элементов в донных отложениях как характеристики вторичного загрязнения речных вод позволил определить реки, для которых опасность такого загрязнения будет наибольшей. Среди рек

бассейна Тузлова наибольшими накопленной массой характеризуются донные отложения рек Тузлов и Большой 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 и Лихая.

Учет данных лабораторного эксперимента, посвященного поведению металлов в системе «донные отложения – речная вода», позволил определить массы элементов, которые потенциально доступны для перехода в речную воду. На основе этих данных выделены реки с наиболее неблагоприятной обстановкой с точки зрения опасности вторичного загрязнения: в бассейне Тузлова – реки Тузлов, Большой и Малый Несветай; в бассейне Северского Донца – Большая Каменка, Лихая, Кундрючья и Большая Гнилуша.

## 5 ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Донные отложения для анализа распределения содержаний элементов и уровней загрязненности с глубиной отобраны на 4 створах. Внешне и в разрезе пробы характеризуются однородной структурой и текстурой. Осадок со среднего створа реки Большая Гнилуша темно-серого цвета, преимущественно пелитового (алеврито-пелитового) состава. Темный цвет пробы в большей степени обусловлен высоким содержанием органического вещества. В то же время отложения реки Малая Каменка от светло-бурого до темно-бурого цвета, с большим содержанием алеврито-песчаного компонента, по всей глубине отмечаются следы окисления железа. Проба с устьевого створа реки Атюхты светло-серого цвета, представляет собой ил алеврито-пелитовый, с увеличением доли алеврито-песчаного компонента с глубиной, отмечены белые вкрапления карбонатов. Осадок, отобранный в верхнем течении реки Большой Несветай, преимущественно алеврито-пелитового состава. Первые 10 см – светло-серого цвета, с большим содержанием алевритового компонента, далее – темно-серого цвета.

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 валовой пробе, в то время как содержания хрома примерно сопоставимы. Это можно объяснить как физико-химическими особенностями как самой пелитовой фракции, так и поведением отдельных элементов в донных отложениях. При этом распределение элементов в пелитовой фракции по глубине будет четко характеризовать динамику уровня техногенного воздействия на изучаемые реки. В таблице 29 представлены данные о содержании элементов в пелитовой фракции донных отложений на створах, где производилось опробование осадка на глубину.

Таблица 29 – Распределение элементов в донных отложениях рек Малая Каменка, Большая Гнилуша, Атюхта и Керета по глубине (составлено автором)

Река	Створ, участок (номер на рисунке 2)	Глубина, см	Содержание элемента, мг/кг							
			Fe	Co	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	Cr
Большая Гнилуша	верхний (пос. Пригородный) (1)	0-5	42980	14,5	1791	66,3	50,5	99,7	15,0	106,8
		5-10	40110	18,1	1745	65,2	47,9	100,9	14,7	106,4
		10-20	43610	19,4	1973	67,5	51,7	102,2	14,7	101,9
		20-30	45710	21,2	2146	77,1	59,8	114,9	36,5	109,3
		30-43	48230	19,5	2039	79,7	62,2	116,5	32,2	112,9
Малая Каменка	устьевой (2)	0-5	60060	9,3	749	68,3	57,4	247,0	61,1	143,6
		5-15	60690	10,3	609	70,9	60,2	252,5	72,3	143,1
		15-21	59360	4,1	564	69,7	59,3	245,1	38,8	144,7
		21-28	54810	9,3	450	68,9	55,5	206,6	48,2	135,2
Керета	верхний (3)	0-10	45220	22,7	2180	65,0	47,2	90,5	45,1	102,0
		10-20	37380	18,3	1699	64,7	48,3	91,6	27,8	115,3
		20-30	43540	15,5	827	78,7	57,9	102,0	36,7	132,5
		30-40	43750	11,0	724	78,1	58,0	93,9	30,4	126,9
Атюхта	устьевой (4)	0-5	47180	42,2	2314	130,8	121,1	370,6	55,4	105,1
		5-15	37730	46,8	3121	121,3	112,7	355,4	19,5	98,5
		15-25	45220	105,7	2578	204,1	196,7	393,5	27,8	100,7
		25-35	55160	190,3	2323	273,8	254,5	454,8	63,6	101,0
		35-42	50470	21,6	855	73,9	69,6	120,8	38,9	102,2

Как видно из данной таблицы, в целом для рассматриваемых осадков по абсолютным концентрациям характерно превалирование железа, марганца, остальные элементы характеризуются значительно меньшими содержаниями. Ранжированный ряд металлов по среднему содержанию в донных отложениях для этих рек выглядит следующим образом: Fe>Mn>Zn>Cr>Ni>Cu>Pb>Co. Подобное распределение в целом хорошо соотносится с распределением элементов в осадках рек в целом по Восточному Донбассу.

Осадки реки Большая Гнилуша характеризуются незначительным увеличением содержания многих металлов с глубиной, при этом минимальные концентрации железа, марганца, никеля, меди, свинца отмечаются в подповерхностном слое 5-10 см. Содержание свинца практически в 2,5 раза увеличивается на глубине 20-30 см, в то же время концентрации остальных элементов изменяются не так значительно (рисунок 31).

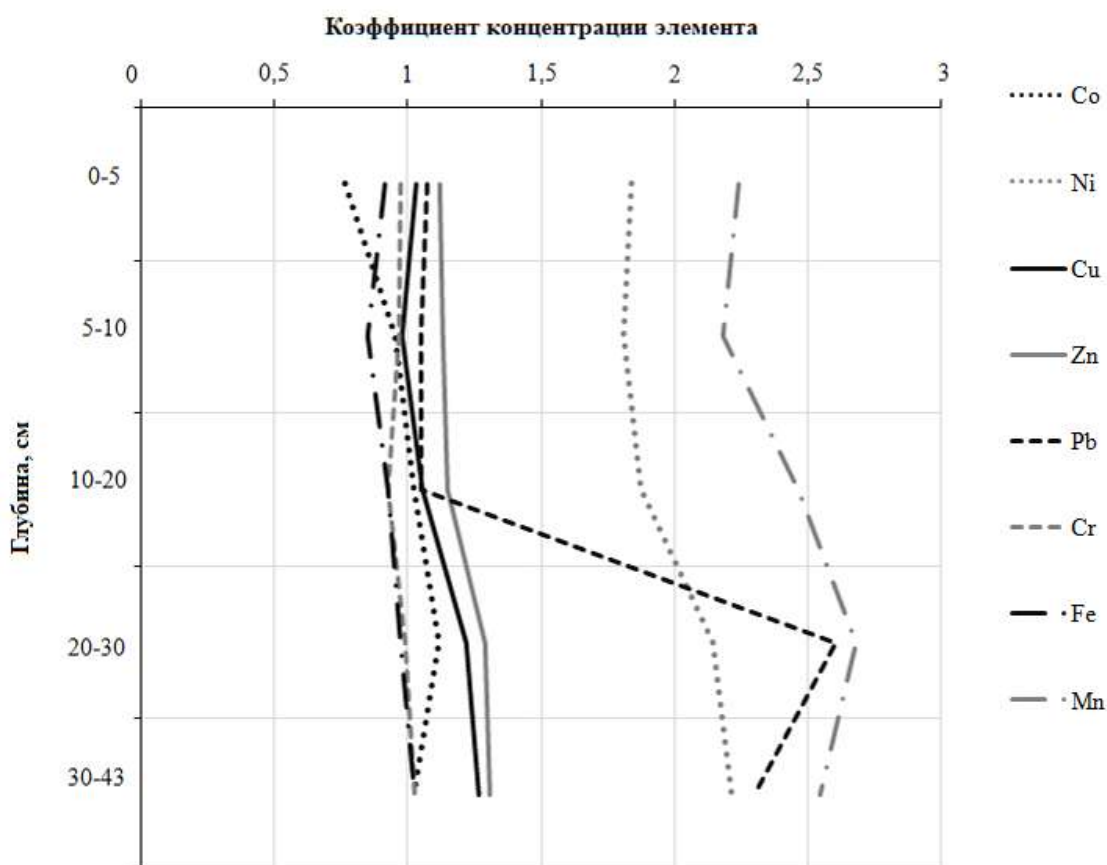


Рисунок 31 – Распределение содержаний металлов в донных осадках реки Большая Гнилуша с глубиной (составлено автором)

Донные осадки реки Малая Каменка характеризуются большими содержаниями железа, цинка, свинца и хрома по сравнению с отложениями реки Большая Гнилуша. Распределение концентраций металлов по глубине в данном случае отличается: максимальные содержания свинца отмечены в слое на глубине 5-15 см, после чего концентрация металла снижается практически в два раза. Как и в предыдущем случае, содержания остальных элементов изменяются незначительно (рисунок 32).

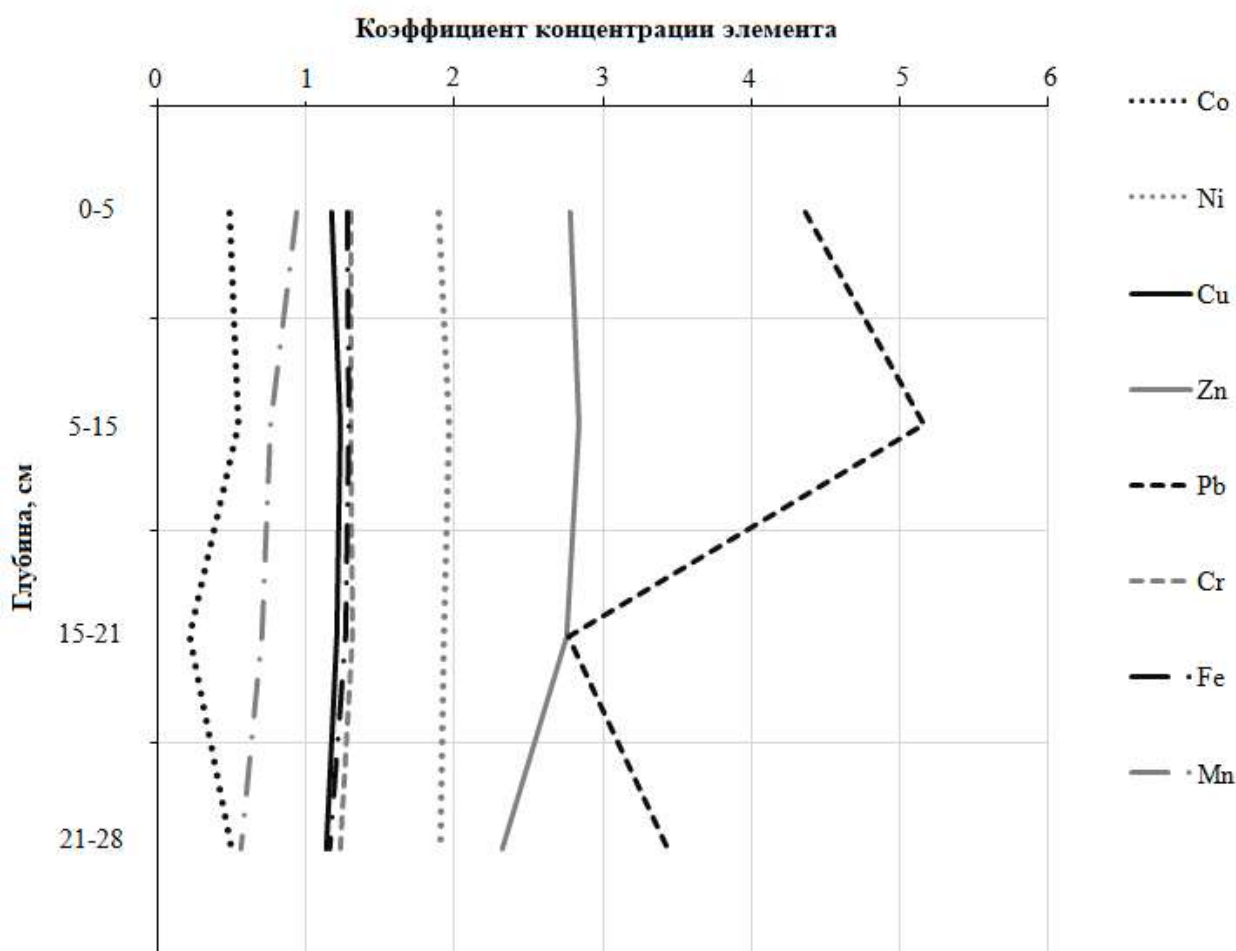


Рисунок 32 – График распределения содержания металлов в донных осадках реки Малая Каменка с глубиной (составлено автором)

В донных осадках реки Кереты (притока реки Большой Несветай) распределение элементов по глубине характеризуется следующими особенностями. Содержания хрома, цинка, меди и железа изменяются в небольших пределах. Концентрации марганца и кобальта последовательно

уменьшаются от поверхностного слоя до самого глубокого. В интервале 20-30 см отмечается увеличение содержаний никеля и свинца, при этом если для последнего содержание в целом уменьшается с глубиной за счет максимального значения в поверхностном слое, то для никеля ситуация обратная (рисунок 33).

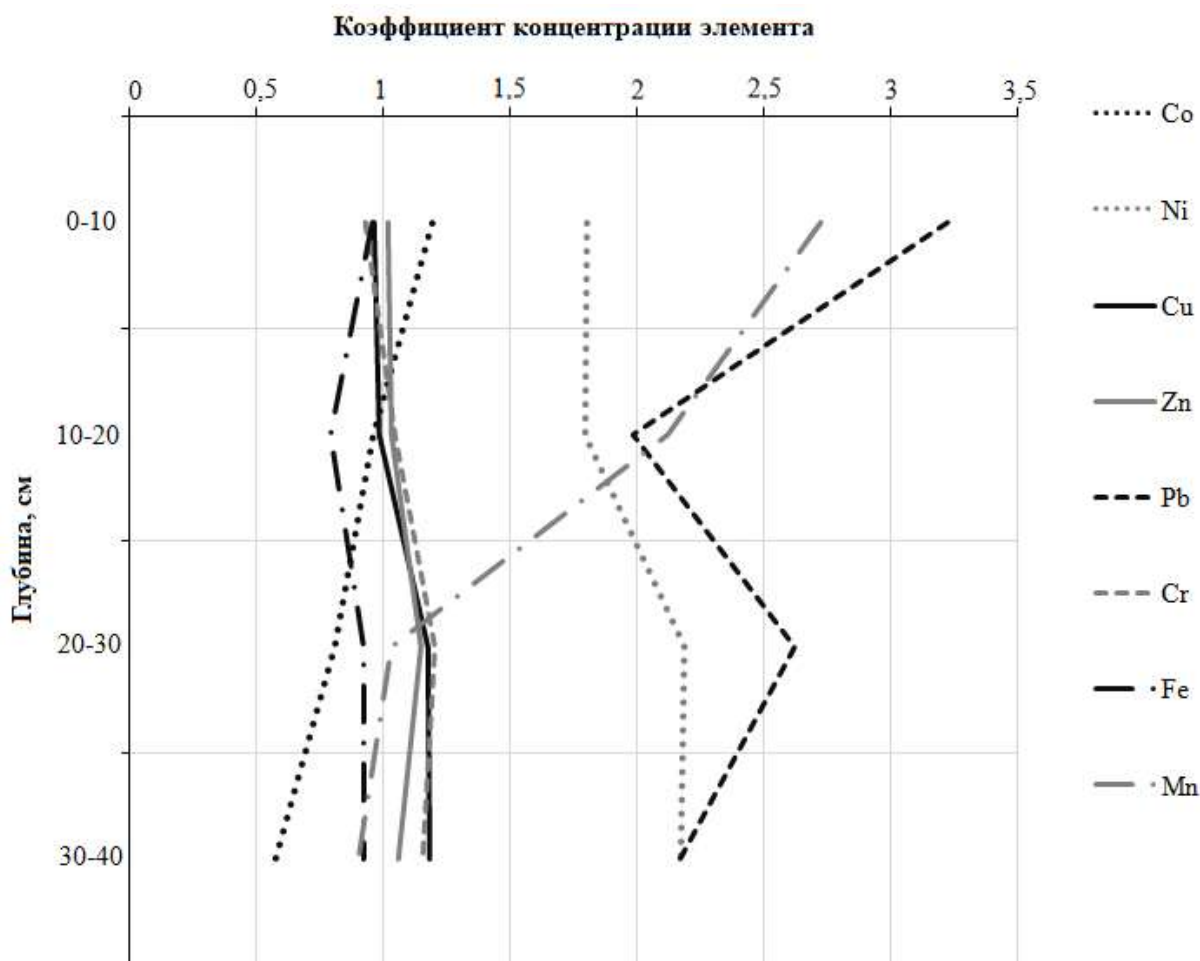


Рисунок 33 – График распределения содержания металлов в донных осадках реки Керета с глубиной (составлено автором)

Распределение содержания металлов в осадках реки Атюхта с глубиной будет характеризоваться следующими особенностями. В интервале 15-25 см и 25-35 см наблюдается резкое увеличение содержаний кобальта, никеля, цинка и меди. Наибольшая концентрация марганца отмечается в подповерхностном слое, после чего происходит ее уменьшение с глубиной. Содержание свинца максимально в интервале глубин 25-35 см, при этом минимальные значения

приходятся на глубины с 5 до 25 см. Содержания железа и хрома изменяются незначительно (рисунок 34).

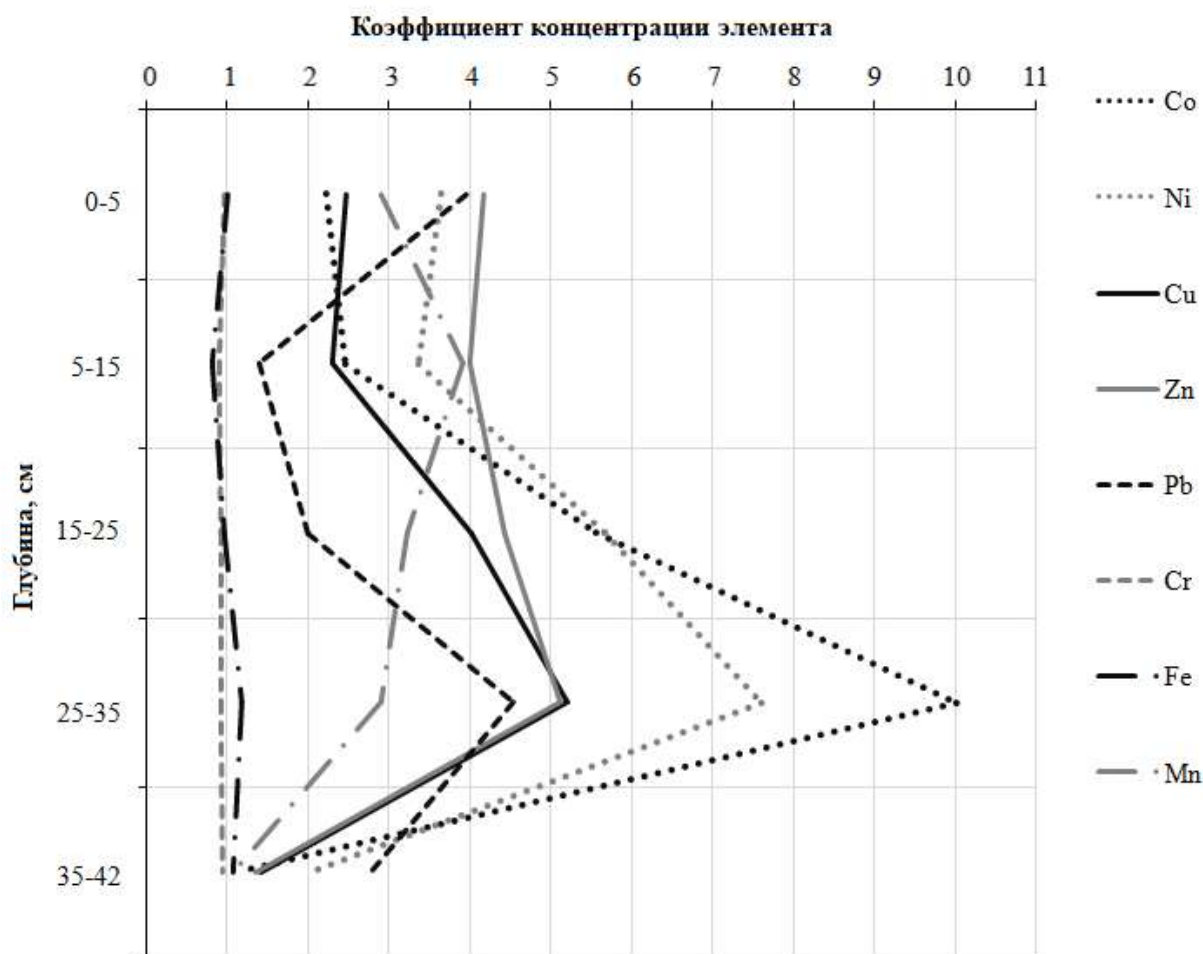


Рисунок 34 – График распределения содержания металлов в донных осадках реки Атюхта с глубиной (составлено автором)

Расчет коэффициентов концентрации элементов по слоям позволил выявить структуру геохимической ассоциации элементов в донных осадках изучаемых рек. Для отложений реки Большая Гнилуша ассоциация металлов будет выглядеть в среднем следующим образом:  $Mn_{2,4} Ni_{2,0} Pb_{1,6}$ , в то время как для реки Малая Каменка –  $Pb_{3,9} Zn_{2,7} Ni_{1,9}$ . Геохимическая ассоциация донных отложений реки Керета включает в себя  $Pb_{2,5} Ni_{2,0} Mn_{1,7}$ ; а реки Атюхта –  $Ni_{4,5} Co_{4,3} Zn_{3,8} Cu_{3,1} Pb_{2,9} Mn_{2,8}$ .

Как и по структуре геохимической аномалии, так и по величинам коэффициентов концентраций входящих в неё элементов, наибольший уровень техногенного воздействия наблюдается для донных отложений реки Атюхта.

Геохимические ассоциации донных отложений рек Керета, Большая Гнилуша и Малая Каменка в целом включают в себя меньшее число элементов: Mn, Ni и Pb встречаются в аномальных содержаниях в осадках рек Большой Гнилуши и Кереты, Ni, Zn, Pb – в осадках реки Малой Каменки. Тем самым, Ni, Pb, Mn и Zn в структуре геохимической аномалии изученных рек наблюдаются наиболее часто.

С точки зрения временных тенденций изменчивости уровня загрязненности донных отложений исследуемые реки можно разделить на две группы. Для осадков рек Керета и Малая Каменка содержания большинства элементов с глубиной изменяются незначительно. 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 по приурочены к глубинам 20-30 см и 25-35 см соответственно, после чего наблюдается их снижение. При этом по абсолютным концентрациям осадки реки Атюхта превосходят отложения других изученных рек, что объясняется его расположением. Створ на реке Большая Гнилуша заложен выше города Красный Сулин, у поселка Пригородный, тем самым предполагалось исключить влияние городских и промышленных стоков на поверхностные воды и донные отложения реки. Устьевой створ реки Атюхта находится в черте пос. Каменоломни, в зоне влияния шахты им. Красина [19].

Чтобы охарактеризовать не только пространственные особенности уровня техногенного воздействия, а также проследить динамику его изменения,

интегральный показатель загрязненности донных отложений ИПЗ<sub>до</sub> был рассчитан и для донных отложений, полученных при колонковом опробовании (таблица 30). Чтобы продемонстрировать, какие металлы вносят большой вклад в итоговую характеристику уровня загрязненности, в таблице приведены формулы геохимической ассоциации донных отложений.

Таблица 30 – Оценка уровня загрязненности и характеристика геохимической ассоциации донных отложений рек Большая Гнилуша, Малая Каменка, Атюхта и Керета на основе ИПЗ<sub>до</sub> (составлено автором)

Река	Створ, участок	Глубина, см	Формула геохимической ассоциации	ИПЗ <sub>до</sub>	Уровень загрязненности
Большая Гнилуша	верхний	0-5	Mn <sub>2,2</sub> Ni <sub>1,8</sub>	2,8	Слабый
		5-10	Mn <sub>2,2</sub> Ni <sub>1,8</sub>	2,7	Слабый
		10-20	Mn <sub>2,5</sub> Ni <sub>1,9</sub>	2,9	Слабый
		20-30	Mn <sub>2,7</sub> Pb <sub>2,6</sub> Ni <sub>2,1</sub>	4,2	Умеренный
		30-43	Mn <sub>2,6</sub> Pb <sub>2,3</sub> Ni <sub>2,2</sub>	4,0	Умеренный
Малая Каменка	устьевой	0-5	Pb <sub>4,4</sub> Zn <sub>2,8</sub> Ni <sub>1,9</sub>	6,4	Умеренный
		5-15	Pb <sub>5,2</sub> Zn <sub>2,8</sub> Ni <sub>2,0</sub>	7,1	Высокий
		15-21	Pb <sub>2,8</sub> Zn <sub>2,8</sub> Ni <sub>1,9</sub>	5,2	Умеренный
		21-28	Pb <sub>3,4</sub> Zn <sub>2,3</sub> Ni <sub>1,9</sub>	5,4	Умеренный
Керета	верхний	0-10	Pb <sub>3,2</sub> Mn <sub>2,7</sub> Ni <sub>1,8</sub>	4,5	Умеренный
		10-20	Mn <sub>2,1</sub> Pb <sub>2,0</sub> Ni <sub>1,8</sub>	3,4	Слабый
		20-30	Pb <sub>2,6</sub> Ni <sub>2,2</sub>	5,2	Умеренный
		30-40	Ni <sub>2,2</sub> Pb <sub>2,2</sub>	4,7	Умеренный
Атюхта	устьевой	0-5	Zn <sub>4,2</sub> Pb <sub>4,0</sub> Ni <sub>3,6</sub> Mn <sub>2,9</sub> Cu <sub>2,5</sub> Co <sub>2,2</sub>	6,2	Умеренный
		5-15	Zn <sub>4,0</sub> Mn <sub>3,9</sub> Ni <sub>3,4</sub> Co <sub>2,5</sub> Cu <sub>2,3</sub>	5,6	Умеренный
		15-25	Ni <sub>5,7</sub> Co <sub>5,6</sub> Zn <sub>4,4</sub> Cu <sub>4,0</sub> Mn <sub>3,2</sub> Pb <sub>2,0</sub>	7,9	Высокий
		25-35	Co <sub>10,0</sub> Ni <sub>7,6</sub> Cu <sub>5,2</sub> Zn <sub>5,1</sub> Pb <sub>4,6</sub> Mn <sub>2,9</sub>	11,6	Высокий
		35-42	Pb <sub>2,8</sub> Ni <sub>2,1</sub>	5,1	Умеренный

Степень загрязненности донных отложений реки Большая Гнилуша с глубиной изменяется от слабой в поверхностном слое (0-5 см) до умеренной в двух наиболее глубоких слоях (20-30 см и 30-43 см). Повышение уровня загрязненности вызвано увеличением в них содержания свинца – элемента II класса опасности, в то время как Mn и Ni в пределах всех слоев характеризуются аномальными содержаниями.

Степень загрязненности донных отложений реки Малая Каменка изменяется от умеренной до высокой (5-15 см). По величине ИПЗ<sub>до</sub>, как и в случае с содержаниями элементов, наблюдается тенденция к снижению с глубиной. Высокий уровень загрязненности осадков в подповерхностном слое обусловлен более высокими содержаниями свинца ( $K_C = 5,2$ ).

Донные отложения реки Керета характеризуются слабым уровнем загрязнения в подповерхностном слое (10-20 см), в остальном – умеренным уровнем. Как и в случае с ранее описанными реками, наибольший вклад в итоговое значение показателя вносит свинец, характеризующийся наибольшими коэффициентами концентрации и токсичности.

Наибольший уровень загрязнения донных осадков по ИПЗ<sub>до</sub> (умеренный и высокий) отмечается в пределах устьевого створа реки Атюхта, где наблюдается наибольший набор элементов с аномальными содержаниями. Самое высокое значение показателя наблюдается на интервале 25-35 см.

Среди рассматриваемых рек только для донных отложений Малой Каменки наибольший уровень загрязнения по ИПЗ<sub>до</sub> 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<sub>до</sub> приходится на интервал 20-30 см. Наибольшая дифференциация в значениях показателя ИПЗ<sub>до</sub> характерна для осадков реки Атюхта, уровень загрязнения которых меняется от умеренного до высокого. Максимальный уровень загрязнения отмечен на том же интервале, где наблюдаются и наибольшие содержания элементов (25-35 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. В работах исследователей ЮНЦ РАН [65, 66] установлено, что скорость осадконакопления в дельте Дона составляет от 10 до 30 мм/год. Несмотря на схожесть природно-климатических условий, реки Восточного Донбасса отличаются своей небольшой водностью, поэтому напрямую эти данные применять не стоит. Исследования малых и средних рек европейской части России [7, 62] указывают на то, что скорость осадконакопления отличается для рек разного размера и с разной степенью распаханности водосбора. Так, для малых рек с большой площадью лесов на водосборах скорость осадконакопления составляет в пределах 0,3-0,5 мм/год, тогда как в степной зоне с преобладанием распаханых земель на водосборе скорость накопления аллювия может достигать 2,5-3,0 см/год [7]. Кроме того, авторы исследования [62] 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 водосборов Восточного Донбасса. С учетом того, что для рек бассейнов Северского Донца и Тузлова 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. Таким образом, глубине 35 см соответствует 2005 год, а 20 см – 2013 год.

В работе А.И. Гавришина [11] приводится анализ изменчивости объемов сбрасываемых шахтных вод и выноса растворенных веществ, включая железо и

сульфаты. Несмотря на то, что наибольший объем сбрасываемых шахтных вод отмечается в 1992 г., объем выноса ими растворенных веществ, железа и сульфатов на поверхность достиг максимальных значений в период с 2006 по 2010 годы, превышая показатели периода до ликвидации угольных шахт. Тем самым, наблюдаемые максимальные содержания металлов и уровни загрязненности по вертикальному разрезу донных отложений соответствуют периоду наибольшего воздействия на реки Восточного Донбасса техногенных шахтных вод.

Для того, чтобы наглядно показать влияние шахтных вод на химический состав донных отложений, произведено сравнение соответствующих ассоциаций типоморфных элементов. Как и указывалось ранее, наибольшие содержания среди элементов характерны для Mn и Fe, коэффициенты концентрации остальных элементов значительно ниже.

При сопоставлении геохимических ассоциаций донных отложений рек (таблица 30) и шахтных вод (таблица 22) можно заметить некоторое сходство. В структуре геохимической ассоциации донных отложений указанных створов (таблица 30) наиболее часто встречаются марганец, свинец и никель – типоморфные элементы шахтных вод. Высокие содержания цинка и кобальта в отдельных пробах устьевого створа реки Атюхта также связано с шахтными водами. Как указывают авторы работ [55, 61], эти элементы переносятся преимущественно во взвешенном состоянии, адсорбируясь на пелитовой фракции. Кроме того, значительная доля цинка и кобальта в речных водах связана с гидроксидами железа и марганца (до 80 и 60 % соответственно). С учетом того, что последние поступают в речные воды вместе с шахтными водами, соосаждение и нахождение этих элементов в донных осадках напрямую связано с воздействием угледобывающей промышленности.

Тем самым, степень техногенного воздействия на изучаемые реки имеет различную динамику. Поверхностные осадки рек Большая Гнилуша и Атюхта характеризуются более низкими содержаниями элементов и уровнем загрязнения, чем отложения на интервале глубин 20-30 и 25-35 см соответственно. Во многом

уровень загрязнения осадков на этих створах обусловлен влиянием высокоминерализованных техногенных шахтных вод.

Для осадков реки Малая Каменка поверхностные слои являются наиболее загрязненными, что, учитывая расположение створа, отражает совокупное воздействие на водосбор. Уровень загрязненности осадков реки Керета в целом характеризуется незначительными изменениями, в целом обусловленные вариациями содержания свинца в отложениях. Шахтные воды и донные отложения характеризуются схожим набором типоморфных элементов, поэтому можно сделать вывод о том, что микроэлементный состав речных осадков во многом формируется за счет прямого поступления техногенных шахтных вод в водотоки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного 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<sub>до</sub>). Основным отличием предлагаемого 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<sub>до</sub> 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  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 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 ( $\text{Pb}_{2,3} \text{Ni}_{2,1}$ ), 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 отложениях 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 и 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 ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекин, О. А. Основы гидрохимии / Учебное пособие / О.А. Алекин // Л.: Гидрометеиздат, 1970. 442 с.
2. Алексеенко, В.А. Металлы в окружающей среде. Почвы геохимических ландшафтов Ростовской области: Учебное пособие / В.А. Алексеенко, А.В. Суворинов, В.Ан. Алексеенко, А.Б. Бофанова // М.: Логос, 2002. 312 с.
3. Алимова, Г.С. Средняя плотность запасов тяжелых металлов в донных отложениях малых рек бассейна Верхней Оби Самсоновская, Лев и Вандрас / Г.С. Алимова, Е.С. Земцова, А.Ю. Токарева // Успехи современного естествознания. Науки о Земле (25.00.00), 2016. № 10. С. 110-113.
4. Ашихмина, Т.Я., Изучение состояния природного комплекса в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината / Т.Я. Ашихмина, Е.В. Дабах, Г.Я. Кантор, А.П. Лемешко, С.Г. Скугорева, Т.А. Адамович // Теоретическая и прикладная экология, 2010. № 3. С. 18-26.
5. Безуглова, О.С. Почвы Ростовской области / О.С. Безуглова, М.М. Хырхырова // Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
6. Блинов, С.М. Современное техногенное минералообразование в аллювии рек Кизеловского угольного бассейна / С.М. Блинов, Н.Г. Максимович, Е.А. Меньшикова // Российская академия наук Уральское отделение Минералогия техногенеза, 2003. Т. 4. С. 20-38.
7. Бутаков, Г.П. Формирование антропогенно обусловленного наилка на поймах рек Русской равнины / Г.П. Бутаков, С.Г. Курбанова, А.В. Панин, А.А. Перевощиков, И.А. Серебренникова // Эрозионные и русловые процессы. МГУ им. М. В. Ломоносова, Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозии, русловых и устьевых процессов при МГУ; под редакцией Р.С. Чалова. Москва, 2000. С. 78-92.

8. Валиев, В. С. Метод комплексной оценки загрязненности донных отложений / В. С. Валиев, Д. В. Иванов, Р. Р. Шагидуллин // Труды Карельского научного центра РАН, 2019. № 9. С. 51–59.
9. Вальков, В.Ф. Почвы Ростовской области: генезис, география и экология: монография / В.Ф. Вальков, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников // Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. 316 с.
10. Гавришин, А.И. Влияние функционирования и ликвидации угольных шахт на химический состав природных вод в Восточном Донбассе / А.И. Гавришин // Материалы научно-практической конференции с межд. участием «Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России». Часть 1. Ростов-на-Дону, 2009. С. 43-46.
11. Гавришин, А.И. Некоторые важные закономерности формирования химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе / А.И. Гавришин // Фундаментальные исследования, 2014. № 11-11. С. 2465-2470.
12. Гавришин, А.И. Шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на состав подземных и поверхностных вод региона / А.И. Гавришин // Водные ресурсы, 2018. Т. 45. № 5. С. 555-565.
13. Гавришин, А.И. Распределение химического состава шахтных вод на территории Восточного Донбасса / А.И. Гавришин, В.Е. Борисова, Е.С. Торопова // Геология и геофизика Юга России, 2018. №2. С. 5–15.
14. Гавришин, А.И. О загрязнении поверхностных вод в Восточном Донбассе / А.И. Гавришин, В.М. Суховий, А.Д. Быкова // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха, Е.В. Булдаковой, А.Д. Деменева, О.Н. Ереминой, В.Г. Заиканова, В.Н. Катаева, Ю.А. Мамаева, О.Ю. Мещеряковой, 2019. С. 284-289.
15. Гарькуша, Д.Н. Распределение метана и сероводорода в донных отложениях лиманов, водохранилищ и прудов юга Европейской части России / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Федоров, Н.С. Тамбиева, Р.Г. Трубник, Н.В. Оськина //

Межвузовский сборник научных трудов «Современные проблемы географии». Астрахань, 2022. С. 6-19.

16. Геология СССР. Том XLVI. Ростовская, Волгоградская, Астраханская области и Калмыцкая АССР. Часть 1. Геологическое описание / Коллектив авторов; ред. Ф.А. Белов // М.: Недра, 1970. 667 с.

17. Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий. Сборник трудов научной конференции с международным участием; Южный федеральный университет / под ред. В.Е. Закруткина, А.М. Никанорова и др. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. 366 с.

18. Гибков, Е.В. 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.

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

20. ГИС-Атлас «Недра России» / глав. ред О.В. Петров. СПб.: ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского»; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. И.С. Грамберга», 2011.

21. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введ. 1982-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 5 с.

22. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. Введ. 2014-01-01. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 32 с.

23. Григорьев, Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры / Н.А. Григорьев // Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2009. 381 с.

24. Даувальтер, В.А. Исследование физического и химического состава донных отложений при оценке экологического состояния водоемов: учеб. пособие по дисциплине «Геохимия окружающей среды» для направления 511100 «Экология и природопользование» и специальности 013600 "Геоэкология" / В.А. Даувальтер // Мурманск: Изд-во МГТУ, 2006. 84 с .

25. Даувальтер, В.А. Оценка экологического состояния поверхностных вод по результатам исследований химического состава донных отложений: Учеб. пособие по дисциплине «Геохимия окружающей среды» для направления 511100 «Экология и природопользование» и специальности 013600 «Геоэкология» / В.А. Даувальтер // Мурманск: Изд-во МГТУ, 2005. 88 с.

26. Даувальтер, В.А. Оценка экологического состояния арктической пресноводной системы по результатам исследований содержания тяжелых металлов в донных отложениях / В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин // Геохимия, 2018. № 8. С. 805-819.

27. Денисова, А.И. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды / А.И. Денисова, Е.Л. Нахшина, Б.И. Новиков, А.К. Рябов // Киев: Наук. думка, 1987. 164 с.

28. Джамалов, Р.Г. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние / Р.Г. Джамалов, М.Б. Киреева, А.Е. Косолапов, Н.Л. Фролова // М.: ГЕОС, 2017. 205 с.

29. Закруткин, В.Е. Высокоуглеродистые формации раннего докембрия европейской части СССР / В. Е. Закруткин // Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1982. 286 с.

30. Закруткин, В.Е. Техногенные геохимические потоки угледобывающих территорий и их влияние на окружающую среду (на примере Донецкого бассейна) / В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2016. № 3 (191). С. 66-71.

31. 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.

32. Закруткин, В.Е. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков, О.С. Решетняк, В.Н. Решетняк // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2020. № 2. С. 259-271.

33. Закруткин, В.Е. Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе / В.Е. Закруткин, В.М. Иваник, Е.В. Гибков // Российской академии наук. Серия географическая, 2010. № 5. С. 94–102.

34. Закруткин, В.Е. Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны Юга России (в пределах Ростовской области) / В.Е. Закруткин, Н.И. Коронкевич, Д.Ю. Шишкина, С.В. Долгов // Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного университета, 2004. 252 с.

35. Закруткин, В.Е. Основные тенденции изменения состояния окружающей среды и социально-экономического развития углепромышленных районов Восточного Донбасса в связи с реструктуризацией угольной отрасли / В.Е. Закруткин, Ю.Ю. Меринова, Е.В. Гибков, Ю.Н. Меринов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2017. № 4-1 (196-1). С. 121-127.

36. Закруткин, В.Е. О химическом составе твердофазных атмосферных выпадений на территории углепромышленных районов Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, А. В. Петрова // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы I Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2015 г.). Казань: Бук, 2015. С. 7-14.

37. 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.

38. Закруткин, В.Е. Аутигенные минералы железа в речных отложениях Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, Е.В. Гибков, Г.Ю. Складенко // Геология и геофизика Юга России, 2023. Т. 13, № 3. С. 102-121.

39. Закруткин, В.Е. Донные отложения рек техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: сравнительная оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами по отечественным и зарубежным критериям / В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, О.С. Решетняк, Е.В. Гибков // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2021. Т. 85. № 4. С. 554-564.

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

41. Закруткин, В.Е. Гидроэкологические особенности поверхностных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, О.С. Решетняк, Е.Н. Бакаева // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2020. № 3. С. 451-460.

42. Закруткин, В.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества: монография / В.Е. Закруткин, Г.Ю. Складенко, Е.Н. Бакаева, О.С. Решетняк, Е.В. Гибков, Н.Е. Фоменко // Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 172 с.

43. Заяц, Г.Н. Шахтные воды Ростовской области / Г.Н. Заяц, Н.Н. Фесенко // Гидрохимические материалы Т. 35 М.: Изд-во АН СССР, 1963. С.131-134.

44. Казеев, К.Ш. Изучение почв эталонных участков при биодиагностике антропогенного воздействия / К.Ш. Казеев // Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред. Тезисы докладов Международной конференции, 2013. С. 87.

45. Казеев, К.Ш. Биологические особенности локально-гидроморфных почв Ростовской области / К.Ш. Казеев, С.Е. Фомин, С.И. Колесников, В.Ф. Вальков // Почвоведение, 2004. № 3. С. 361-372.

46. Колесников, С.И. Разработка региональных экологических нормативов содержания загрязняющих веществ в почвах Юга России / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, Т.В. Денисова, Е.В. Даденко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2012. № 82. С. 152-168.

47. Колесников, С.И. Опыт определения региональных предельно допустимых концентраций свинца в почвах в районе предприятия цветной металлургии / С.И. Колесников, Д.И. Мощенко, А.А. Кузина, К.Ш. Казеев // Экология и промышленность России, 2023. Т. 27. № 7. С. 48-52.

48. Коломенский, Г.Ю. Экологические последствия ликвидации шахт Восточного Донбасса и необходимость совершенствования системы экомониторинга / Г.Ю. Коломенский, Л.В. Гипич, В.Г. Коломенская, С.А. Михалев, В.И. Седлецкий // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2006. № 2 (134). С. 79-82.

49. Концепция развития угольной промышленности Ростовской области на период до 2030 года; утверждена постановлением Правительства Ростовской области от 05.07.2012 № 599 / Официальный портал Правительства Ростовской области [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://minstroy.donland.ru>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. Дата обращения 15.02.2023 г.

50. Косинова, И.И. Методологические особенности оценки экологического состояния донных отложений искусственно созданных водных объектов / И. И. Косинова, Т. В. Соколова // Вестник ВГУ. Серия: Геология, 2015. № 3. С. 113-121.

51. Косолапов, А.Е. Река Тузлов. План управления бассейном / А.Е. Косолапов, Н.Т. Дандара, В.Н. Шкура и др. // Новочеркасск: Сев.-Кав. филиал ФГУП «Российский НИИ комплексного обследования и охраны водных ресурсов», Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2007. 165 с.

52. Красавцева Е.А. Состояние водных объектов в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий на примере ООО «Ловозерский ГОК» / Е.А. Красавцева, С.С. Сандимиров // Вода и экология: проблемы и решения, 2021. № 2 (86). С. 3-13.

53. Куракина, Н. И. Оценка состояния донных отложений по результатам контрольных измерений концентраций загрязняющих веществ в восточной части Финского залива / Н. И. Куракина, Н. С. Шлыгина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. № 4. С. 72-78.

54. Лацынник, Е.С. Состав соединений тяжелых металлов в почвах зоны влияния терриконов угольных отвалов Ростовской области / Е.С. Лацынник, Т.В. Бауэр, А.В. Барахов, С.С. Манджиева, Т.М. Минкина // Материалы Международной научной конференции, посвященной первому профессору почвоведения на Урале, заведующему кафедрой почвоведения (1924-1932) Василию Васильевичу Никитину, 100-летию первой кафедры почвоведения на Урале, 140-летию науки почвоведения. II Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах». Пермь, 2023. С. 307-312.

55. Линник, П.Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П.Н. Линник, Б.И. Набиванец // Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 270 с.

56. Ломтадзе, В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / В.Д. Ломтадзе // Л.: Недра, 1990. 328 с. : ил.

57. Лубнина, Н.В. Магнитотактические бактерии и биомагнетизм: критерии отбора образцов для национального банка-депозитария живых систем / Н.В. Лубнина, А.Ю. Бычков // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2015. № 4. С. 49-52.

58. Лурье, П. М. Река Дон: Гидрография и режим стока / П.М. Лурье, В.Д. Панов // Ростов-на-Дону, Донской издательский дом, 2018. 592 с.

59. Максимович, Н.Г. Изучение миграции техногенных донных отложений с применением современных геоинформационных систем /

Н.Г. Максимович, О.А. Березина, О.Ю. Мещерякова, А.Д. Деменев // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2020. Т. 26. № 2. С. 201-211.

60. Малахов, И.Н. Условия формирования донных осадков устьевых участков рек Днепровско-Бугского лимана в условиях антропогенной нагрузки / И.Н. Малахов, Т.Н. Алехина, В.В. Иванченко, А.А. Бобко, Н.Р. Журавель // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2010. №2. С. 69-78.

61. Манихин, В.И. Растворенные и подвижные формы тяжелых металлов в донных отложениях пресноводных экосистем: [Монография] / В. И. Манихин, А. М. Никаноров // СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 181 с.

62. Маркелов, М.В. Изменение скорости аккумуляции наносов на поймах малых рек в центре русской равнины / М.В. Маркелов, В.Н. Голосов, В.Р. Беляев // Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2012. № 5. С. 70-76.

63. Мартынова, М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем / М.В. Мартынова; [отв. ред. Т.И. Моисеенко] // Институт водных проблем РАН. М.: Наука, 2010. 243 с.

64. Мартынова, М.В. Железо и марганец в пресноводных отложениях. Монография / Отв. ред. д.г.н. Мартынова М.В. М., 2014. 215 с.

65. Матишов, Г.Г. Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья / Г.Г. Матишов, Л.В. Дашкевич, В.В. Титов, Е.Э. Кириллова // Наука Юга России, 2021. Т. 17. № 1. С. 13-23.

66. Матишов, Г.Г. Нижний Дон: уникальная речная артерия и ее экологические проблемы / Г.Г. Матишов, О.А. Хорошев, К.С. Сушко, О.В. Степаньян, Ю.В. Малик // Природа, 2023. № 3 (1291). С. 36-50.

67. Методика НСАМ № 155-ХС (редакция 2015 г.) Определение меди, цинка, кадмия, висмута, сурьмы, свинца, кобальта, никеля, железа и марганца в горных породах, рудном и нерудном минеральном сырье, продуктах его переработки, объектах окружающей среды атомно-абсорбционным методом / ФГУП «ВИМС», 2015.

68. Молодкин, П.Ф. Антропогенное рельефообразование степных равнин. / Молодкин П.Ф. // Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1992. 80 с.
69. Молодкин, П.Ф. Равнины Нижнего Дона / Молодкин П.Ф. // Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1980. 134 с.
70. Мохов, А.В. Трещинообразование под влиянием затопления угольных шахт и его гидродинамическое значение / А.В. Мохов // Доклады Академии наук. 2007. Т. 414. № 2. С. 223-225.
71. Мохов, А.В. Влияние угольного комплекса на геоэкологическую ситуацию / А.В. Мохов, Б.И. Журбицкий, Г.К. Карасев, А.И. Дымна // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. Г.Г. Матишов. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. С. 129-138.
72. Мохов, А.В. О причинах подтопления земной поверхности в горнодобывающих регионах (на примере Восточного Донбасса) / А.В. Мохов, А.Г. Химченко, Б.В. Селиванов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2008. № 2. С. 189-195.
73. Мур, Дж. Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния: Пер. с англ. / Дж. Мур, С. Рамамурти // М.: Мир, 1987. 288 с.
74. Назарова, Л.Н. О взаимосвязях между содержанием серы в угольном пласте и компонентами химического состава шахтных вод Восточного Донбасса / Л.Н. Назарова, В.Ю. Берман // Гидрохимические материалы Т. 50 Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1969. С.83-91.
75. Налета, Е.В. Изменение биологических свойств почв крупных городов Ростовской области под влиянием загрязнения тяжелыми металлами / Е.В. Налета, О.А. Капралова, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 6. С. 716.
76. Никаноров, А.М. Гидрохимия: Учебник. / А.М. Никаноров // СПб: Гидрометеоздат, 2001. 444 с.
77. Никаноров, А.М. Современный химический состав речных вод на территории Восточного Донбасса / А.М. Никаноров, В.Е. Закруткин, О.С. Решетняк // Материалы научной конференции с международным участием

«Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод», Ростов-на-Дону, 8-10 сентября 2015 г. Часть 2. Ростов-на-Дону, 2015 б. С. 263-267.

78. Никаноров, А.М. Изменчивость химического состава и качества поверхностных вод техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса / А.М. Никаноров, О.С. Решетняк, В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, Е.В. Гибков // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. IV Всероссийской научной конференции с международным участием, 2015 а. С. 186-188.

79. Овчарова, Е.П. Геохимические критерии оценки загрязнения донных отложений / Е. П. Овчарова, О. В. Кадацкая, Е. В. Санец, В. С. Хомич // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых: материалы Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашёва (1907-1987), 23-25 мая 2017 г., Минск / БГУ, Геогр. Фак.; Отв. ред. О. В. Лукашёв; редкол.: А. Ф. Санько [ и др.]: в 2 ч. Минск: Право и экономика, 2017. Ч.2. С. 104-107.

80. Панов, В.Д. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра / В.Д. Панов, П.М. Лурье, Ю.А. Ларионов // Ростов-на-Дону: ООО «Донской издательский дом», 2006. 336 с.

81. Папина, Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода взвешенное вещество донные отложения речных экосистем: Аналит. обзор / Т.С. Папина // ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН. Новосибирск, 2001. 58 с.

82. ПНД Ф 16. 1:2.2:2.3:3.36-2002. Количественный химический анализ почв. Методика измерений валового содержания кадмия, кобальта, марганца, меди, никеля, свинца, хрома и цинка в почвах, донных отложениях, осадках сточных вод и отходах методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. Москва, ФБУ «ФЦАО», 2002 г. - (изд. 2011 г.).

83. Приваленко, В.В. Эколого-геохимические исследования городов Нижнего Дона / В.В. Приваленко, Ю.А. Домбровский, В.М. Остроухова,

В.Л. Шустова, А.А. Базелюк, Н.П. Остробородько // Облкомприроды. Ростов-на-Дону, 1994. 268 с.

84. Приваленко, В.В. Экологические проблемы Восточного Донбасса / В.В. Приваленко, З.Р. Кузина, Г.Ю. Коломенский, Л.В. Гипич // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2004. № 57. С. 36-49.

85. Приказ Минсельхоза России № 552 от 13 декабря 2016 г. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изм. от 22.08.2023).

86. Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. акад. Г.Г. Матишов. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. 352 с.

87. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям / В.П. Емельянова, Е.Е. Лобченко // Введ. 2004-01-01. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 49 с.

88. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Том 7. Донской регион / Под ред. Д.Д. Мордухай-Болтовского // Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.

89. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 6. Украина и Молдавия. Выпуск 3. Бассейн Северского Донца и реки Приазовья / Под ред. к.т.н. М.С. Каганера // Л.: Гидрометеиздат, 1967. 491 с.

90. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 7. Донской район / Под ред. к.г.н. М.С. Протасьева // Л.: Гидрометеиздат, 1973. 459 с.

91. Решетняк, В.Н. Изменчивость качества речных вод в бассейне Северского Донца за многолетний период / В.Н. Решетняк // Материалы XXII Международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий», 2017. С. 26.

92. Решетняк, В.Н. Минералогические особенности донных отложений в зоне влияния предприятий угледобывающей промышленности (на примере рек бассейна Северского Донца) / В.Н. Решетняк, Е.В. Гибков // Сборник трудов II научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы наук о Земле». Министерство образования и науки Российской Федерации; ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Институт наук о Земле; Всероссийская общественная организация «Русское географическое общество», 2016. С. 442-444.

93. 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.

94. Решетняк, В.Н. Количественная оценка накопленной массы тяжелых металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса / В.Н. Решетняк, В.Е. Закруткин // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы и инновационные технологии в развитии географических наук». Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, 2020. С. 528-530.

95. Решетняк, В.Н. Об интегральной оценке уровня загрязненности донных отложений рек в пределах техногенно-нарушенных территорий / В.Н. Решетняк, В.Е. Закруткин // Материалы IV Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления IV»)). Ростов-на-Дону, 2022. С. 304-307.

96. 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.

97. Решетняк, В.Н. Миграционная способность металлов в системе «вода донные отложения» (на примере рек бассейна Тузлова) / В.Н. Решетняк, О.С. Решетняк // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН», 2017. С. 514-515.

98. Решетняк, В.Н. Тенденции изменчивости качества воды реки Тузлов / В.Н. Решетняк, О.С. Решетняк // Сборник трудов научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы наук о Земле». Под ред.: Кузнецов А.Н. (ответственный редактор), Коханистая Н.В. (ответственный секретарь) и др., 2015. С. 404-407.

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

100. Решетняк, О.С. Микроэлементы в речных водах Восточного Донбасса / О.С. Решетняк, В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков // Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий. Сборник трудов научной конференции с международным участием; ЮФУ. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2015. С. 283-295.

101. Сает, Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин // М.: Недра, 1990. 335 с.

102. Середа, Л.О. Эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения почвенного покрова промышленных городов / Л.О. Середа, С.А. Куролап, Л.А. Яблонских // Воронеж: Издательство «Научная книга», 2018. 196 с.

103. Складенко, Г.Ю. Подземные воды Ростовской области: факторы загрязнения и оценка качества / Г.Ю. Складенко, В.Е. Закруткин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2019. № 4. С. 98-103.

104. Скляренко, Г.Ю. Подземные и поверхностные воды, как среда активной миграции химических элементов в пределах природно-техногенной биогехимической провинции Восточного Донбасса / Г.Ю. Скляренко, В.Е. Закруткин // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием в 2 томах.: Южный федеральный университет. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 161-166.

105. Скляренко, Г.Ю. Влияние угледобычи в Донбассе на подземные и поверхностные воды / Г.Ю. Скляренко, В.Е. Закруткин, А.Р. Зубов, Л.Г. Зубова, О.С. Решетняк // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2017. № 3-1 (195-1). С. 100-107.

106. Слуковский, З.И. Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде / З.И. Слуковский, С.А. Светов // География и природные ресурсы, 2016. № 1. С. 38-45.

107. Соколова О.В. Трансформация загрязнений в системе речная вода – поровый раствор – твердая фаза донных отложений в малых реках (на примере водотоков Национального парка Лосиный остров) / О.В. Соколова, Д.В. Гричук, Т.В. Шестакова, К.А. Пестова // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2008. № 2. С. 46-57.

108. Солнцева Н.П. Влияние техногенных потоков на геохимию лесных почв (в связи с угледобычей) / Н.П. Солнцева, Е.М. Никифорова // В кн.: Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С. 82–119.

109. Угледобывающая отрасль / Официальный портал Правительства Ростовской области реестр [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.donland.ru/activity/800/>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. Дата обращения 08.06.2023 г.

110. Угольная база России. Том I. Угольные бассейны и месторождения европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс,

Подмосковный, Камский и Печорский бассейны, Урал) / Гл. редактор В.Ф. Череповский. М.: ЗАО "Геоинформмарк", 2000. 483 с.

111. Файдов, О.Е. Ресурсы угля / О.Е. Файдов // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. Г.Г. Матишов. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. С. 18-26.

112. Федоров, Ю.А. О первых результатах экспедиционных работ по изучению содержания ртути в донных отложениях малых рек бассейна Дона / Ю.А. Федоров, А.В. Михайленко, Д.Н. Гарькуша, И.В. Доценко, Л.Ю. Дмитрик // Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы. Взгляд в будущее». Под редакцией Ю. А. Федорова; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону Таганрог, 2020. С. 650-655.

113. Федоров, Ю.А. Микрочастицы как фактор, оказывающий влияние на аккумуляцию тяжелых металлов в почве, дорожной пыли и донных отложениях / Ю.А. Федоров, В.И. Чепурная, Д.Н. Гарькуша, И.В. Доценко, А.В. Михайленко, Ю.В. Попов, И.Ю. Гаврилова // Геология, география и глобальная энергия, 2022. № 3 (86). С. 89-105.

114. Хованский, А.Д. Геохимия аквальных ландшафтов /А.Д. Хованский // Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1993. 240 с.

115. Хрусталева, Ю.П. Климат и агроклиматические ресурсы Ростовской области / Ю.П. Хрусталева, В.Н. Василенко, И.В. Свисюк, В.Д. Панов, Ю.А.Ларионов // Ростов-на-Дону: Батайское книжное издательство, 2002. 250 с.

116. Шишкина Д.Ю. Сельскохозяйственное воздействие на агроландшафты Ростовской области // Самарский научный вестник, 2021. Т. 10, № 4. С. 129-133.

117. Шварцев, С.Л. Средние концентрации химических элементов в подземных водах зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев //Академия наук СССР. Сибирское отделение. Геология и геофизика, 1978. № 4. С. 63-75.

118. Экологический атлас Ростовской области / Под ред. В.Е. Закруткина // Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 120 с.

119. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2014 году» под общей редакцией Василенко В. Н.; Урбана Г. А.; Куренкова А. Г.; Толчеевой С. В.; Покуля С. Ю.; Правительство Ростовской области, Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области, 2015. 385 с.

120. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2021 году» под общей редакцией Фишкина М.В. // Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области, 2022. 396 с.

121. Янин, Е.П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки угольных месторождений / Е.П. Янин // Экологическая экспертиза, 2019. № 6. С. 2-59.

122. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек агроландшафтов (формирование, состав, экологическая оценка) / Е.П. Янин // Теоретическая и прикладная экология, 2009. № 1. С. 66-71.

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

124. Янин Е.П. Техногенные илы как вторичный источник загрязнения речных вод / Е.П. Янин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2015. № 9. С. 17–25.

125. Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности) / Е.П. Янин // М.: НП «АРСО», 2018. 415 с.

126. Abraham, G.M.S. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand / G.M.S. Abraham, R.J. Parker // Environ Monit Assess, 2008. 136, 227–238.

127. Ávila, P.F. Geochemistry and Mineralogy of Mill Tailings Impoundments from the Panasqueira Mine (Portugal): Implications for the Surrounding Environment /

P.F. Ávila, E.F. Silva, A.R. Salgueiro, J.A. Farinha // *Mine Water and the Environment*, 2008. 27, 210-224.

128. Carrillo, K. C. Spatial distribution and level of contamination of potentially toxic elements in sediments and soils of a biological reserve wetland, northern Amazon region of Ecuador / K. C. Carrillo, J. C. Drouet, A. Rodríguez-Romero, A. Tovar-Sanchez, G. Ruiz-Gutierrez, J. R. Viguri Fuente // *Journal of Environmental Management*, 2021. 289 (2021) 112495.

129. Chen, Y. Metals in Yellow River estuary sediments during the 2018 water-sediment regulation scheme period / Y. Chen, M. Liu, X. Zhang, X. Bu, J. Chen, X. Wu // *Marine Pollution Bulletin*, 2021. V. 166. Article No. 112177.

130. Dendievel, A.-M. Metal pollution trajectories and mixture risk assessed by combining dated cores and subsurface sediments along a major European river (Rhône River, France) / A.-M. Dendievel, B. Mourier, A. Dabrin, H. Delile, A. Coynel, A. Gosset, Y. Liber, J.-F. Berger, J.-Ph. Bedell // *Environment International*, 2020. 144, 106032.

131. Gloaguen, T.V. A grain-size correction for metal pollution indexes in river sediments / T.V. Gloaguen, P.N.S.D. Motta, C.F. Couto // *International Journal of Sediment Research*, 2021. 36, P. 362–372.

132. Hakanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach / L. Hakanson // *Water Research*, 1980. Vol. 14, Issue 8. pp. 975-1001.

133. Hakanson, L. Sediment Sampling in Different Aquatic Environments: Statistical aspects /L. Hakanson // *Water resources research*, 1984. Vol. 20, No. 1. pp. 41-46.

134. Hakanson, L. Principles of lake sedimentology / L. Hakanson, M. Jansson // Berlin: Springer-Verlag, 1983. 316 p.

135. Kim, S. Distribution of metal contamination and grain size in the sediments of Nakdong River, Korea / S. Kim, D.S. Yang, Y.S. Kim // *Environ Monit Assess*, 2020. 192, 502.

136. Klemt, W. H. Assessment of vanadium and nickel enrichment in Lower Athabasca River floodplain lake sediment within the Athabasca Oil Sands Region (Canada) / W. H. Klemt, M. L. Kay, J. A. Wiklund, B. B. Wolfe, R. I. Hall // *Environmental Pollution*, 2020. 265, 114920.
137. León-García, G. J. Assessment of heavy metal pollution in sediments of the Sonora River basin impacted by mining activities / G. J. León-García, A. Gómez-Álvarez, D. M. Meza-Figueroa, J. L. Valenzuela-García, M. A. Encinas-Romero, A. I. Villalba-Atondo, E. Centeno-García, K. K. Encinas-Soto // *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2022. 41(3). Article e13796.
138. Magni, L. F. Evaluation of heavy metal contamination levels in river sediments and their risk to human health in urban areas: A case study in the Matanza-Riachuelo Basin, Argentina / L.F. Magni, L.N. Castro, A.E. Rendina // *Environmental Research*, 2021. Volume 197, June 2021, 110979.
139. Malsiu, A. Water quality and sediment contamination assessment of the Batllava Lake in Kosovo using fractionation methods and pollution indicators / A. Malsiu, I. Shehu, T. Stafilov, F. Faiku // *Arabian Journal of Geosciences*, 2020. 13:412.
140. Mohammed, F. K. A preliminary assessment of heavy metals in sediments from the Ciperu and South Oropouche Rivers in Trinidad, West Indies / F.K. Mohammed, J. Sieuraj, M. Seepersaud // *Environ Monit Assess*, 2017. 189, 396.
141. Müller, G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River / G. Müller // *Geojournal*, 1969. 2, 108–118.
142. Nasrabadi, T. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin / T. Nasrabadi, G.N. Bidhendi, A. Karbassi, N. Mehrdadi // *Environ Monit Assess*, 2010. Dec; 171(1-4), Pp. 395-410.
143. Oyewumi, O. Evaluating stream sediment chemistry within an agricultural catchment of Lebanon, Northeastern USA / O. Oyewumi, J. Feldman, J.R. Gourley // *Environ Monit Assess*, 2017. 189, 141.

144. Oyewumi, O. The impact of poultry litter application on sediment chemistry of the Broadkill River estuary system, Delaware / O. Oyewumi, M.E. Schreiber, S. Ciparis // *Environ Monit Assess*, 2014. 186, 97–115.

145. Raza, A. Distribution, enrichment, and source identification of selected heavy metals in surface sediments of the Siran River, Mansehra, Pakistan / A. Raza, A. Farooqi, A. Javed, W. Ali // *Environmental monitoring and assessment*, 2016. 188:572.

146. Reshetnyak, O.S. Bottom sediments of rivers as a natural sorbent material for metals (according to experimental data) / O.S. Reshetnyak, V.N. Reshetnyak // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018). Abstracts & Schedule*. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. Pp. 291-292.

147. Reshetnyak, V.N. Effect of mining water on river sediments within the Eastern Donbass / V.N. Reshetnyak// *XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. Saint Petersburg, 2021. Pp. 194-195.

148. Reshetnyak, V.N. Granulometric distribution of the Kundryuchya and Bolshaya Gnilusha Rivers sediments (Rostov Region, Krasniy Sulin) / V.N. Reshetnyak, A.D. Sazonov, O.S. Reshetnyak // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2019)*. Editors: I.Parinov, B. T. Long, NTH Minh, N. D. Toan, S. H. Chang. 2019. Pp. 268-269.

149. Roberts, A.P. Searching for single-domain magnetite in the «pseudo-single-domain» sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations / A.P. Roberts, L. Chiang, D. Heslop, F. Florindo, J.C. Larrasoana // *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 117, (2012). B08104.

150. Smith, T. B. Individual and cumulative effects of agriculture, forestry and metal mining activities on the metal and phosphorus content of fluvial fine-grained sediment; Quesnel River Basin, British Columbia, Canada / T. B. Smith, P. N. Owens // *Science of The Total Environment*, 2014. Volume 496, Pages 435-442.

151. Tomlinson, D.C., Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of a pollution index / D.C. Tomlinson, J.G. Wilson, C.R. Harris, D.W. Jeffery // *Helgolander Meeresunters*, 1980. 33, 566-575.

152. Wang, J. Geochemical transfer of cadmium in river sediments near a lead-zinc smelter / J. Wang, Y. Jiang, J. Sun, J. She, M. Yin, F. Fang, T. Xiao, G. Song, J. Liu // *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020. Jun 15;196:110529.

153. Wei, L. Spatial Attenuation of Mining / Smelting-Derived Metal Pollution in Sediments From Tributaries of the Upper Han River, China / L. Wei, M. Cai, Y. Du // *Mine Water Environ*, 2019; 38, 410-420.

154. 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. № 3 (83). C. 32-40.

155. Zakrutkin, V. Trends in the spatial and temporal variability of the river water quality of the Eastern Donbas / V. Zakrutkin, O. Reshetnyak, E. Gibkov, V. Reshetnyak // 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, 2017. C. 753-760.