

*На правах рукописи*

*Меньшикова Елена Александровна*

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность 25.00.08 – «Инженерная геология, мерзлотоведение  
и грунтоведение»

**Автореферат**

*диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук*

Пермь, 2022

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный консультант:

**Осовецкий Борис Михайлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры минералогии и петрографии ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь)

Официальные оппоненты:

**Макаров Анатолий Борисович** – доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геологии поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург)

**Опекунов Анатолий Юрьевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры геоэкологии и природопользования, Институт наук о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (г. Санкт-Петербург)

**Земсков Александр Николаевич** – доктор технических наук, генеральный директор ООО «Зарубежшахтострой» (г. Пермь)

Ведущая организация:

«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь)

Защита диссертации состоится «19» мая 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.03.10 по адресу 614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>)

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д ПНИПУ.03.10

доктор технических наук, доцент



О. А. Маковецкий

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В условиях роста масштабов и интенсивности техногенного воздействия, изучение техногенно-измененной геологической среды является одной из приоритетных задач современной инженерной геологии. Наиболее активными центрами этого влияния являются территории с горнодобывающим профилем хозяйствования. Особенности трансформации природной среды, взаимодействия ее компонентов с инженерными сооружениями рассматриваются в аспекте природно-технических систем (ПТС) как совокупности взаимосвязанных природных и искусственных объектов, формирующихся в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека (Ломтадзе, 1999; Ревзон, 1992; Мазур, 2001). Для горнодобывающих территорий ведущую роль в ПТС играют процессы взаимодействия объектов (технических систем) с некоторой областью литосферы (геологической средой). Подобные системы рассматриваются как литотехнические (ЛТС) (Бондарик, 2004). В ЛТС взаимодействие составляющих сопровождается специфическими инженерно-геологическими процессами, что делает их особым объектом изучения инженерной геологии. В них активно протекают процессы формирования техногенных грунтов, которые инициируются различной инженерно-хозяйственной деятельностью и благодаря значительной мощности (прежде всего на участках размещения отходов горнодобывающей отрасли) играют существенную роль в преобразовании геологической среды.

Важной методологической задачей современного инженерно-геологического изучения грунтов является генетический подход, который стал основой современного грунтоведения. Он состоит в том, что состав, строение, состояние и свойства грунтов рассматриваются как результат их генезиса и последующих постгенетических преобразований, а среди широкого перечня факторов изменения грунтов в условиях интенсификации техногенного воздействия принимается во внимание и антропогенный (Абатурова и др., 2020; Стороженко, 2016). Развитию фундаментальных аспектов генетического подхода к изучению состава и свойств грунтов посвящены работы Е.М.Сергеева (1986),

В.И.Осипова (1996), В.Н.Соколова (2013), В.Т.Трофимова (2019), Е.Н.Огородниковой (2004) и др. Однако вопросы формирования техногенных грунтов как литогенной основы природно-технических систем изучены не достаточно полно, особенно важной и малоизученной проблемой являются механизмы искусственного седиментогенеза.

**Целью** работы является разработка теоретических подходов исследования литогенной основы природно-технических систем горнодобывающих и промышленных территорий, перспективных для прогнозирования состояния геологической среды при прогрессирующем техногенном воздействии.

#### **Основные задачи работы.**

1. Типизация механизмов образования техногенных грунтов в развитие генетического подхода к изучению грунтов в инженерно-геологических и инженерно-экологических целях.

2. Оценка техногенных компонентов в составе грунтов горнопромышленных территорий, включающая изучение их ассоциаций на петрографическом, минеральном и геохимическом уровнях.

3. Изучение уровня техногенной нагрузки на ЛТС, особенностей и механизмов природно-техногенной седиментации для прогноза негативных экологических последствий хозяйственной деятельности.

4. Оценка миграционной способности техногенных компонентов, условий их рассеяния и концентрации с целью определения зон влияния горнопромышленных территорий.

5. Исследование прикладных аспектов, связанных с техногенными грунтами – возможных негативных экологических последствий, обоснование допустимых состояний ЛТС, направления практического использования техногенных грунтов в развитие нормативной базы инженерных изысканий для объектов капитального строительства.

#### **Научная новизна**

1. Впервые разработаны методические подходы к оценке состава техногенных грунтов ПТС горнопромышленных территорий, основанных на

выявленных закономерностях искусственного седиментогенеза и комплексировании широкого перечня методов прецизионных исследований, включающих электронную микроскопию, микрозондовый, синхронный термический (ДСК/ТГ), рентгенофлуоресцентный, дифрактометрический, масс-спектрометрический с ИСП анализы.

2. Выявлены закономерности миграции твердых техногенных продуктов в ПТС горнопромышленных территорий, условий их рассеяния и концентрации с целью определения зон влияния горнопромышленных территорий.

3. Предложены новые направления мониторинга территорий с высокой техногенной нагрузкой, реализованные на примере ПТС Кизеловского угольного бассейна, с оценкой в грунтах техногенной ассоциации компонентов (их устойчивости и токсичности), техногенно-геохимических ассоциаций элементов, развития процессов минералообразования.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в развитии концепции природно-технических систем и представлений о трансформации геологической среды в условиях техногенного воздействия.

**Практическая значимость** работы определяется использованием полученных результатов в ходе мониторинга геологической среды на территориях с высокой техногенной нагрузкой, прогнозированием зон развития негативных экологических последствий хозяйственной деятельности человека, разработкой схем использования техногенных грунтов.

**Методология исследования** основывается на системном подходе к изучению и оценке техногенных грунтов как специфических природно-техногенных объектов. В основе методологических приемов находятся представления о диалектике преобразовательной деятельности человека, необходимости прогноза ее результатов.

**Методы исследования.** Использован широкий арсенал полевых, лабораторных и экспериментальных исследований. При проведении полевых исследований сочетались методы, применяемые в практике инженерно-экологических изысканий, в частности – маршрутные наблюдения,

геоэкологическое опробование. Для характеристики вещественного состава и структуры техногенных осадков использована комплексная методика исследований с учетом условий их образования, особое внимание уделялось выбору методики отбора и обогащения проб.

Лабораторно-аналитические исследования включали гранулометрический, в том числе с применением метода лазерной дифракции (Analysette 22 Micro Tec plus, Fritsch), минералогический, электронно-микроскопический (JSM-6390LV, Jeol), синхронный термический (STA 409 PC Luxx, Netzsch), микронзондовый (EDSINCA 350 Energy, Oxford Instruments), рентгенофлуоресцентный (S8 Tiger, Bruker), дифрактометрический (D2 Phaser, Bruker), атомно-абсорбционный и масс-спектрометрический с ИСП (Aurora M90, Bruker) и др. анализы.

На этапе обработки выполнено теоретическое обобщение опубликованных и фондовых данных, материалов собственных исследований, использованы методы математической статистики. Экспериментальные исследования включали опыты по оценке миграционной способности техногенных продуктов, обменным процессам в грунтах и осадках, моделированию схем использования отходов.

**Объекты исследования** – литогенная основа природно-технических систем (грунты, осадки, почвы, отходы) горнопромышленных территорий мира. Основные территории проведения собственных исследований автора – Кизеловский угольный бассейн, Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, ПТС хвостохранилищ Качканарского и Костомукшского горно-обогатительных комбинатов, территории градопромышленных агломераций Уральского региона – города Пермь, Екатеринбург, Нижний Тагил, Миасс, Челябинск и др.

**Фактический материал и личный вклад автора.** Исходным материалом для работы послужили результаты выполнения научных проектов под руководством автора по программе Министерства образования РФ «Фундаментальные исследования высшей школы» (2004 г.), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 04–05–96037 «Закономерности формирования состава речных осадков малых рек в условиях техногенного

воздействия», 2004–2005 г.г.; 19–05–50071 Микромир «Оценка воздействия взвешенных наносов рек горнодобывающих районов на экологическое состояние Камского водохранилища», 2020–2022 г.г.), научной темы в рамках госзадания – «Исследование процессов современного аллювиального седиментогенеза» (2008–2009 г.г.), проекта в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г. по теме «Разработка концепции экологически безопасного освоения Верхнекамского месторождения солей». Исследования автора по направлению каменного литья выполнены в рамках участия в научном проекте МИГ «Оценка минерально-сырьевой базы Пермского края для обеспечения производства высокотехнологичного базальтового волокна» (2012–2014 г.г.). Значительная часть материала работы получена при реализации хоздоговорных работ по направлению инженерно-экологических изысканий, в которых автор выступала в качестве руководителя и ответственного исполнителя. В работе обобщены и многочисленные литературные источники мирового опыта прецизионных исследований составляющих ЛТС.

**Степень достоверности и апробации результатов.** По теме диссертации опубликовано более 80 научных работ, в том числе 15 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 статей в рецензируемых изданиях Web of Science и Scopus, 1 монография, 1 патент на изобретение.

**Результаты работ докладывались** на региональных, Всероссийских и Международных конференциях, совещаниях, симпозиумах и конгрессах: XIII Геологический съезд Республики Коми «Геология и минеральные ресурсы Европейского северо-востока России: новые результаты и новые перспективы» (Сыктывкар, 1999); «Теоретические проблемы инженерной геологии» (Москва, 1999); «Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского» (Пермь, 1999, 2004, 2009, 2021); «31-st International Geological Congress» (Rio de Janeiro, Brazil, 2000); «9-th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment» (Durban, South Africa, 2002); «Сергеевские чтения. Годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии» (Москва,

2008, 2013; Пермь, 2019); «Эколого-геологические проблемы урбанизированных территорий» (Екатеринбург, 2009); «Синтез знаний в естественных науках. Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование» (Пермь, 2011); «Базальтовые технологии в России» (Пермь, 2012, 2013, 2017, 2018); «6 Congresso Nazionale AIGA» (Italy, 2018); «International Mine Water Association Conference» (Perm, Russia, 2019); «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы» (Севастополь, 2019); «Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий» (Чита, 2021) и др.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, 5 глав и заключения, представлена на 375 страницах, включая 73 рисунка, 93 таблицы и список литературы из 429 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, определены цели и задачи диссертационной работы, обозначен вклад автора, отражена научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. **В первой главе** рассмотрены ассоциации техногенных компонентов в составе техногенных грунтов, их источники и вещественный состав, приведена характеристика особенностей вещественного состава техногенных грунтов горнопромышленных территорий. **Во второй главе** охарактеризованы механизмы природно-техногенного седиментогенеза как фактора формирования литотехнических систем горнопромышленных территорий, включая механизмы интеграции и дифференциации техногенных частиц, процессы природно-техногенного минералообразования. **Третья глава** посвящена вопросам миграции техногенных компонентов, определяющей размеры зон влияния горнопромышленных территорий. **В четвертой главе** представлены методические подходы к организации литомониторинга природно-технических систем горнопромышленных территорий, приведены конкретные примеры проведения литомониторинговых исследований. **В пятой главе** рассмотрены технологические схемы использования техногенных грунтов в качестве полезных ископаемых, направления рекультивации техногенных массивов с учетом оценки потенциала их самовосстановления и применения отходов производства. **В**



**заклучении** подведены итоги исследования, сформулированы основные выводы и рекомендации.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность своему учителю профессору Б.М.Осовецкому за многолетнюю помощь и поддержку в исследовательской и педагогической работе, а также своим коллегам в Пермском университете на кафедрах минералогии и петрографии, инженерной геологии и охраны недр, лаборатории экологической геологии ЕНИ.

## **ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**1. Формирование литотехнических систем горнопромышленных территорий является результатом сочетания техногенной деятельности и процессов природно-техногенного седиментогенеза с особенностями интеграции и дифференциации природных и техногенных частиц, наложенных процессов природно-техногенного минералообразования. Важнейшими характеристиками вещественного состава грунтов ЛТС являются техногенные ассоциации минеральных компонентов и техногенно-геохимические ассоциации элементов.**

В границах ЛТС как области взаимодействия технических систем с приповерхностной частью литосферы (геологической средой), биосферой и гидросферой активно протекают процессы формирования техногенных грунтов, которые инициируются инженерно-хозяйственной деятельностью человека (рис.1). В условиях крупномасштабных техногенных преобразований в последние десятилетия научным сообществом они рассматриваются в качестве техногенной формации (Каздым, 2005, 2006; Несмеянов и др., 2009, 2020). На данном этапе к ней относят техногенные грунты в пределах крупных городских агломераций или производственных комплексов, прежде всего горнодобывающих.

Формирование техногенных грунтов происходит за счет изменений естественных грунтов в их естественном залегании с изменением физико-механических и физико-химических свойств, перемещения естественных грунтов без существенного изменения свойств (насыпные и намывные грунты в составе грунтовых массивов, насыпей, земляных сооружений), размещения в

геологической среде отходов производства и потребления (шлаки, шламы, бытовые отходы) с развитием процессов разубоживания и миграции составляющих отходов. Указанные процессы рассматриваются в грунтоведении как искусственный седиментогенез (Трофимов, 2002, с.51).



*Рис.1. Схема соотношения компонентов природно-технической системы*

Общеизвестны территориальные особенности развития техногенных грунтов на промышленно развитых территориях, которые связаны с активным поступлением промышленных отходов. Основной объем промышленных отходов концентрируется в относительно небольшом числе регионов в местах добычи полезных ископаемых, а также в районах металлургических, химических, нефтехимических, деревообрабатывающих, целлюлозно-бумажных и некоторых других производств. Для территории РФ подавляющая часть накопленных отходов располагается в Сибирском (18,1 млрд т, или более 57% общероссийской величины) и Уральском (соответственно 6,9 млрд т, или 22%) федеральных округах.

Общая динамика образования отходов показывает тенденцию ежегодного устойчивого увеличения их объема. За период с 2010 г. по 2019 г. совокупная масса отходов, образованных в Российской Федерации, удвоилась с 3725 млн т до 7750,9 млн т (О состоянии ..., 2020). Лидирующей по количеству отходов отраслью является добыча полезных ископаемых (преимущественно угледобыча).

Таким образом, центрами активного влияния человека на геологическую среду, прежде всего, являются горнодобывающие районы, где сосредоточено множество добывающих и перерабатывающих предприятий с мощной инфраструктурой обслуживания.

Размещенные в поверхностных условиях отходы с течением времени подвержены процессам разложения, разубоживания, выветривания, коррозии, зарастания растительностью. Вокруг центров техногенной деятельности постепенно накапливаются большие массы отложений, содержащих в своем составе твердые техногенные продукты. Значительная доля массы частиц твердых отходов затем попадает в речные, озерные и морские осадки, смешивается с ними и участвует в процессах природного седиментогенеза.

Помимо переноса речными водами, озерными и морскими волнами и течениями, значительные массы техногенных частиц распространяются воздушными потоками. Со временем такие отложения занимают все более заметное место в общей массе поверхностных отложений и на некоторых территориях полностью заменяют естественные грунты и осадки. В развитие генетического подхода к изучению грунтов в инженерно-геологических и инженерно-экологических целях существует необходимость выделения и специального изучения процессов природно-техногенного седиментогенеза.

В развитие генетического подхода к изучению грунтов в инженерно-геологических и инженерно-экологических целях можно предложить следующую типизацию механизмов образования техногенных грунтов (табл.1). Для горнодобывающих территорий особого внимания заслуживают группы техногенно-перемещенных и техногенно-преобразованных грунтов. Наиболее значительные массы техногенных грунтов в ЛТС горнопромышленных территорий создаются непосредственно в результате разработки месторождений полезных ископаемых, переработки минерального сырья, проведения строительных работ, рекультивационных мероприятий, дноуглубительных работ в долинах рек.

Табл.1. Типизация механизмов образования техногенных грунтов

| <i>Группы</i>   | <i>Основные процессы</i>  | <i>Примеры</i>  |
|---|---|---|
| <i>Техногенное перемещение</i>                                  | Массы пород, перемещенные человеком без заметного изменения их вещественного состава  | Дамбы и плотины, сооруженные из местных пород, насыпи дорожного полотна, искусственные песчаные площадки в качестве фундамента под здания, карты намыва песчано-гравийной смеси из русел рек и т.д.   |
| <i>Техногенное преобразование</i>                               | Отходы, сформированные в процессе горнодобывающей деятельности, технологических операций (классификации, сортировки, обогащения и др.)  | Отвалы драг и горнообогатительных комбинатов, шламы и эфеля, концентраты гравитационного обогащения, продукты сепарации минералов и многие другие преобразованные природные смеси   |
| <i>Собственно техногенное образование</i>                       | Массы промышленных и бытовых отходов, представленные искусственными продуктами  | Шлаки, золошлаки, шламы, массивы бытовых отходов  |
| <i>Техногенная физическая и физико-химическая трансформация</i> | Естественные грунты, в составе которых некоторые изначально природные минеральные компоненты существенно изменили свой исходный физико-механический и химический состав под влиянием стихийных техногенных и плановых технологических процессов | Минеральные и органические компоненты грунтов в контакте с зараженной средой и активно сорбирующие тяжелые металлы, органические и неорганические вещества; грунты с улучшенными физико-механическими и химическими свойствами за счет плановых процессов |
| <i>Смешанный генезис</i>  | Отложения, сформированные в результате сочетания различных процессов  | Почвы в районах интенсивной техногенной деятельности, культурный слой, осадки смешанного генезиса (делювиально-пролювиальные, аллювиально-пролювиальные, аллювиально-делювиальные и др.) с содержанием техногенных продуктов в диапазоне от 5-95%         |

Важнейшим фактором, определяющим соотношение между природной и техногенными составляющими в составе грунтов и осадков, является уровень техногенной нагрузки. Количественная оценка уровня техногенной нагрузки на ЛТС может быть выражена с учетом следующих параметров: суммарного объема техногенных продуктов, поступающих в единицу времени или за определенный период на определенную площадь; количества токсичных веществ, приходящихся на определенную площадь; степени превышения концентраций элементов, поступивших из техногенных источников, над их природными концентрациями; способности природных сред к самоочищению по отношению к техногенным

веществам. Одним из таких количественных показателей является модуль техногенной нагрузки, который равен отношению массы ежегодно выбрасываемых в атмосферу и размещаемых загрязняющих веществ к площади района ( $\text{т/км}^2$ ). Наряду с этим, может быть учтена суммарная техногенная нагрузка за более длительный период времени (например, за 10 или 100 лет).

Наиболее удобным и широко применяемым методом для количественной оценки техногенного воздействия является учет геохимических показателей. Исходными данными для различных расчетов степени опасности грунтов, осадков и отходов в связи с высокими концентрациями химических элементов являются средние их содержания в наиболее распространенных осадочных образованиях. Для сравнения на практике часто используется кларковое содержание элемента в земной коре, почвах.

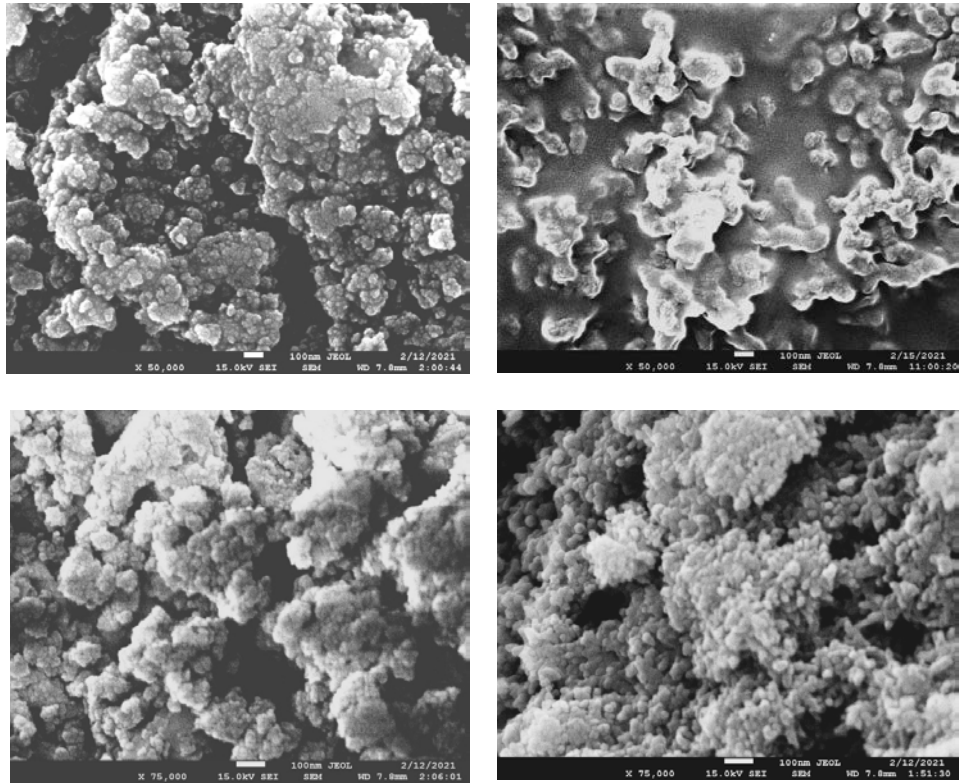
Существует множество подходов к оценке величины техногенной геохимической нагрузки, которые применяются и в практике мониторинга ПТС с целью оценки состояния депонирующих сред (почв, донных отложений, грунтов) и отходов производства (табл.2). Важной задачей в рамках оценки негативных экологических последствий природно-техногенной седиментации является учет токсичности техногенных компонентов в составе техногенных грунтов. В настоящее время учет показателя токсичности при расчете суммарного загрязнения депонирующих сред микроэлементами применяется в практике экологических исследований почв (Водяницкий, 2017). Из приведенного перечня подходов в табл.2 литотоксичность учитывает показатель потенциальной экологической опасности, который предложен для минералов и руд и может применяться для частиц отходов в составе грунтов и осадков.

Расчеты его величины на примере речных осадков Кизеловского угольного бассейна позволили получить сравнительную оценку экологической опасности наиболее широко распространенных техногенных компонентов. Согласно полученным результатам из выделенных видов наибольшую опасность представляют охры – агрегаты гидроксидов железа, которые концентрируют широкий спектр токсичных элементов и имеют низкую абразивную прочность.

Ассоциация элементов с учетом кларков концентрации представлена в охрех следующим рядом – Cd>Sb>As>Co,Cu>Zn>Ni>Fe>V. Электронная микроскопия демонстрирует их сложное агрегатное строение, которое обеспечивает им колоссальную удельную поверхность для сорбционных процессов широкого ряда химических элементов и соединений (рис.2).

Табл.2. Показатели оценки величины техногенной геохимической нагрузки

| Наименование показателя  | Формула расчета  | Область применения              |
|--|--|---------------------------------|
| Суммарный коэффициент ноосферной концентрации $C_n$ (Глазовская, 1997)                         | $C_n = \frac{C_1}{N_{n1}} + \frac{C_2}{N_{n2}} + \dots + \frac{C_i}{N_{ni}},$ где С – содержание компонентов в данном продукте; $N_n$ – кларки соответствующих компонентов в ноосфере (биосфере); $i$ – число аномальных элементов   | Горные породы, руды, отходы     |
| Региональный суммарный коэффициент ноосферной концентрации – $C_{ns}$ (Трофимов, Зилинг, 2002) | $C_{ns} = D_1 C_{n1} + D_1 C_{n1} + \dots + D_k C_{nk},$ где D – техногенное давление различных продуктов на изучаемой территории, k – число аномальных элементов  | Отходы                          |
| Суммарный показатель загрязнения $Z_c$ (Геохимия ..., 1990)                                    | $Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1),$ где $K_c$ – коэффициент концентрации $i$ -того химического элемента; $n$ – количество химических элементов, входящих в геохимическую ассоциацию  | Почвы, донные отложения, грунты |
| Индекс геоаккумуляции (Müller, 1979)   | $I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5B_n},$ где $C_n$ – измеренная концентрация элемента $n$ в донных отложениях (фракция менее 0,02 мм); $B_n$ – геохимическая фоновая концентрация элемента $n$ (определяется по данным специальных региональных исследований), умножение ее на 1,5 осуществляется для учета природных флуктуаций | Донные отложения                |
| Показатель потенциальной экологической опасности (Голева и др., 2001)                          | $ГЭМ = \left(\frac{1}{y}\right) \cdot \sum_{i=1}^n (Tл \cdot X/Q)_1 + \dots (Tл \cdot X/Q)_n,$ где $y$ – устойчивость объекта; Tл – литотоксичность элементов в объекте; X – содержание токсичных элементов в объекте; Q – среднее содержание элементов в окружающей среде   | Руды, минералы, отходы          |
| Индекс антропогенной нагрузки (Pollution Load Index – PLI) (Tomlinson et al., 1980)            | $PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n},$ где CF – фактор загрязнения (отношение концентрации элемента в объекте к его кларку), $n$ – количество элементов  | Почвы, донные отложения, грунты |



*Рис.2. Общие особенности наноструктуры охр (бассейн р. Косъвы)  
(мерная линейка 100 нм)*

**Техногенная ассоциация компонентов.** Определенные сочетания преобладающих в грунтах и осадках техногенных компонентов образуют техногенную ассоциацию компонентов, которые чрезвычайно разнообразны по составу и зависят от многих факторов. Главным из них является характер производственной деятельности в районе исследования. Большое значение имеют положение территории относительно источников поступления техногенных продуктов, характер и динамические параметры агентов переноса, физико-химические свойства компонентов, физико-географическая обстановка.

Среди ассоциаций техногенных компонентов с учетом их происхождения следует различать простые и сложные. Первые непосредственно связаны с каким-либо одним источником питания (предприятием) и их состав полностью отражает характер твердых отходов данного предприятия. Формирование сложных ассоциаций техногенных компонентов в грунтах является таким же многофакторным явлением, как и формирование аналогичных природных минеральных ассоциаций. Этот процесс представляет собой на первом этапе аккумуляцию разнородного техногенного вещества, поступившего в грунты и

осадки из разных источников, а на втором – результат преобразования исходной ассоциации в ходе транспортировки каким-либо агентом (в воде, воздушной среде и др.). В зависимости от уровня и методов изучения ассоциации техногенных компонентов грунтов подразделяются на петрографические, минеральные и геохимические.

**Петрографические ассоциации.** Петрографический состав техногенных компонентов в целом представлен, с одной стороны, обломками пород естественного происхождения, претерпевшими преобразования в ходе хозяйственной деятельности человека, и продуктами искусственного происхождения сложного минерального состава. Типичными формами техногенного преобразования фрагментов пород являются их дробление, классификация с выделением фракций разной крупности, обогащение в различных средах.

Примерами таких процессов является и широкое развитие на территории разработки угольных месторождений угольно-породных частиц, которые являясь отходом горного и обогатительного процесса, складировются вблизи шахт в отвалах, а ранее активно использовались при планировке местности, дорожном строительстве. Указанные отходы представляют собой скопления обломков осадочных горных пород (аргиллиты, алевролиты, песчаники, известняки) с высоким содержанием углистых частиц, из-за чего они имеют черную окраску.

Продуктами искусственного происхождения, являющимися по составу и строению аналогами природных горных пород, являются, например, агрегаты разнородных техногенных частиц, шлаков, обломки бетона и др. Указанные компоненты являются широко распространенными составляющими техногенных грунтов не только горнодобывающих территорий, но составляют существенную часть культурного слоя на территории населенных мест (Даньшин, 1947; Каздым, 2005; Васильева и др., 2020).

**Минеральные ассоциации.** Минеральные техногенные ассоциации представляют собой наиболее сложные и разнообразные по составу сочетания искусственных продуктов техногенной деятельности человека. Это утверждение



демонстрируют многочисленные результаты изучения металлургических шлаков (Россинский, 1974; Баталин, 2003; Ерохин и др., 2012, 2018, 2019, 2021; Пономарев и др., 2018). Размещаемые в отвалах они формируют разнообразные минеральные ассоциации с быстрой сменой состава грунтов в пределах техногенного массива. Указанное демонстрируют исследования автором шлакового отвала Чусовского металлургического завода в междуречье рек Усьвы и Чусовой, где в минеральном составе проб грунтов выделены следующие основные ассоциации (в %): гематит (13) – магнетит (13) – кварцевая (47); гематит (10) – вюстит (20) – магнетитовая (60); кальцит (11) – портландитовая (85); геленит (10) – кварц (13) – периклазовая (57); периклаз (33) – гематитовая (39).

В составе техногенных грунтов могут присутствовать и естественные минеральные ассоциации. Например, в хвостах мокрой магнитной сепарации, размещаемых в хвостохранилище Качканарского ГОКа, доминирует диопсид (42–74%), в меньшем количестве присутствуют плагиоклазы – 7–25%, минералы группы эпидота – 5–15%, амфиболы (обыкновенная роговая обманка и в меньшем количестве актинолит) – 2–15%, титаномагнетит – 1–2%, оливин – 1%. В долях процента находятся хлориты, сульфиды, гранаты, апатит, ильменит, шпинели. Хвосты используются для устройства ограждающих дамб хвостохранилища и с фильтрационными потоками на отдельных участках активно мигрируют на прилегающую территорию, существенно меняя здесь состав грунтов.

**Геохимические ассоциации.** Ассоциации твердых техногенных компонентов, изучаемые на петрографическом и минералогическом уровнях, обуславливают соответствующие геохимические ассоциации (как макрокомпонентов, так и малых элементов), о которых можно судить по данным изучения химического состава грунтов и осадков. Формы нахождения элементов техногенного происхождения в грунтах довольно разнообразны. К ним относятся:

✓ твердые частицы природных минералов и обломки пород, преобразованные в результате техногенной деятельности человека (продукты дробления руд, шламовые частицы и т.д.);

✓ твердые частицы собственно техногенных образований (магнитные и стеклянные сферулы, техногенная пыль, шлаки, металлическая стружка и т.д.);

✓ агрегаты сложного состава, представляющие собой разнообразные сочетания природного и техногенного вещества (например, шлаки с включениями минеральных зерен, сцементированные битумом природные минеральные частицы и т.д.);

✓ оболочки и пленки на природных зернах, образованные в процессе сорбции растворенных веществ;

✓ атомы элементов техногенного происхождения, сорбированные рыхлыми минеральными агрегатами (аморфными гидроксидами и оксидами железа и марганца), органическим веществом и глинистыми частицами (монтмориллонита и др.).

Элементный состав техногенных компонентов в составе техногенных грунтов и осадков изучается разными способами. Применяются следующие варианты его оценки: валовое содержание макро- и микрокомпонентов в источниках техногенного вещества; концентрации малых элементов, обычно тяжелых металлов, в отдельных техногенных видах; концентрации элементов в грунтах, содержащих значительное количество техногенных продуктов.

Последний вариант применяется наиболее часто и позволяет оценить техногенно-геохимические ассоциации элементов в составе грунтов. В этом случае повышенные содержания элементов, особенно токсичных, сравниваются с фоновыми природными значениями. При характеристике техногенных геохимических ассоциаций, формирующихся в грунтах и осадках, на практике используется: коэффициент концентрации элемента ( $K_c$ ); формула геохимической ассоциации как последовательный ряд элементов в порядке уменьшения значений  $K_c$ ; коэффициент среднего накопления химических элементов ( $R_x$ ) как среднее арифметическое значений  $K_c$ ; суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ).

Многочисленные исследования по химическому составу техногенных грунтов показали, что наиболее часто ассоциация техногенных элементов представлена различными сочетаниями таких макрокомпонентов, как железо,

фосфор и марганец. Среди малых элементов в техногенных ассоциациях обычно присутствуют свинец, медь, цинк, мышьяк. Эти ассоциации являются общераспространенными. Однако на отдельных, ограниченных по площади территориях техногенные геохимические ассоциации более разнообразны. Так наиболее сложные ассоциации с высокими концентрациями элементов характерны для грунтов верхней части разреза промышленных и городских территорий с многолетней застройкой (Лихачева и др., 2002; Курбатова и др., 2005; Долгих, 2011; Александровский и др., 2015; Селезнев и др., 2020).

Согласно данным многолетних исследований автора грунты исследованных городских территорий Пермского края с многолетней застройкой характеризуются наибольшей степенью загрязнения, с установленной чрезвычайно опасной категорией ( $Z_c=431-502$ ) за счет повышенных концентраций Hg, As, Zn, Cu, Ni.

По результатам оценки техногенной геохимической нагрузки по крупным промышленным центрам Пермского края, рассмотренные территории развиваются в условиях высокого уровня аэрогенного поступления технофильных элементов с приоритетной ролью Zn, Cu, Cd, Pb. Фактором аккумуляции этих элементов в грунтах также является использование противогололедных реагентов с высоким содержанием солей. Положительный хозяйственный эффект сопровождается засолением и подщелачиванием снеговых, почвенных и грунтовых вод, усиливая аккумуляцию катионогенных элементов (Королев, 2009; Ворончихина и др., 2014; Герасимов и др., 2015; Малышева и др., 2018).

Для горнопромышленных районов характер техногенных геохимических ассоциаций в техногенных грунтах и осадках определяется видом добываемого минерального сырья, масштабами горной добычи, технологией переработки сырья и особенностями получаемых продуктов. Поэтому они весьма специфичны и варьируют достаточно широко. Согласно исследованиям автора, для территории разработки Верхнекамского месторождения калийных солей в донных отложениях водотоков в зоне влияния разрешенного сброса сточных вод с учетом показателя донной аккумуляции характерно присутствие следующего

геохимического ряда элементов  $Zn > Cu > Ni > Pb > As > Cd$ . Разрабатываемые калийные руды являются источником поступления в окружающую среду  $^{40}K$ , который концентрируется в почвах, грунтах и донных отложениях прилегающих к рудоуправлениям территориях. Микроэлементный состав почв и грунтов в районе разработки Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд характеризуется практически повсеместным повышенным валовым содержанием V, Co, Cr, As, Bi.

**Систематика техногенных продуктов.** Для целей разработки мероприятий по снижению негативных экологических последствий хозяйственной деятельности и прогнозирования состояния техногенных массивов необходима классификация техногенных продуктов, содержащихся в грунтах и осадках.

Техногенные продукты можно подразделять: по их генезису на группы (типы), отвечающие наиболее распространенным формам производственной деятельности, сопровождающейся образованием большого количества твердых отходов; по степени однородности (гомогенные и гетерогенные); по минеральному составу (на типы и классы, соответствующие аналогичной классификации природных минеральных видов); по плотности (плавучие (плотность  $< 1 \text{ г/см}^3$ ), легкие ( $1\text{--}2,9 \text{ г/см}^3$ ), тяжелые ( $2,9\text{--}6 \text{ г/см}^3$ ) и сверхтяжелые ( $> 6 \text{ г/см}^3$ )); по размерности (по литологической систематике – псефитовые, псаммитовые, алевритовые и пелитовые); по физическим свойствам (растворимость в воде, твердость, гидравлическая крупность, хрупкость, смачиваемость и др.), которые играют важную роль в процессах миграции и концентрации техногенных частиц в водной и воздушной средах). Для экологических целей целесообразно выделять твердые продукты разной степени токсичности (1, 2, 3 и 4 групп).

**Механизмы природно-техногенной седиментации.** Важной задачей современного этапа развития грунтоведения является детализация особенностей природно-техногенной седиментации. Непосредственное поступление техногенных составляющих в компоненты окружающей среды ПТС происходит путем осаждения их из воздуха, а также в результате привноса временными

потоками, размывающими пункты складирования отходов, при разливе паводковых вод в долинах рек. Процессы накопления в грунтах и осадках техногенных продуктов, т.е. процессы природно-техногенной седиментации, на первом этапе включают *процессы интеграции*, которые выражаются смешением в грунтах весьма разнородного материала, поступившего из разных источников.

Соотношение техногенных продуктов, поступивших из разных источников в грунты и осадки, прямо пропорционально соотношению объемов локальных выбросов твердых веществ за вычетом легко растворимых и плавучих компонентов. Общая доля техногенного материала в грунтах и осадках конкретного участка определяется суммарным объемом поступившего твердого техногенного материала и динамическими свойствами транспортирующей среды (водобильность, скорость потока, сила ветра и т.д.).

Количество поступающих в долины рек техногенных веществ зависит от активности русловой (боковой) эрозии на территориях интенсивной производственной деятельности. Масштабы этого процесса оцениваются, в том числе, с помощью дистанционных методов (дешифрированием снимков разных лет) и стационарных наблюдений (Riaza et al., 2015; Гиниятуллина и др., 2014, 2015; Березина и др., 2018; Seifi et al., 2019; Ryankov et al., 2021).

В наиболее сложных формах интеграция техногенных компонентов в осадках происходит на территории крупных промышленных центров, обладающих значительным и разнообразным комплексом источников выбросов. В интегрированной массе техногенного вещества грунтов по характерному составу и свойствам отдельных компонентов могут быть определены источники их поступления. Классическими зонами наиболее сложного проявления процессов интеграции продуктов техногенной деятельности человека являются морские побережья в районах интенсивной техногенной деятельности (Colizza et al., 1996; Moore et al., 2000; Ивлиева и др., 2003, 2009).

*Процессы дифференциации* реализуются на следующем этапе природно-техногенной седиментации и наиболее ярко проявляются при участии водной среды. Они сводятся к закономерному перераспределению техногенных частиц в

грунтах и осадках разной крупности, т.е. по гранулометрическим фракциям. Размер техногенных частиц является одним из важнейших факторов, определяющих их распределение в грунтовой массе.

Разное поведение малых элементов в грунтах и осадках также связано с крупностью зерен их минералов-носителей. Это подтверждается многочисленными примерами определения концентраций техногенных элементов. Они обычно обусловлены изменением содержания глинистых частиц в грунтах и осадках, с которыми указанные концентрации имеют тесную положительную связь. Процессы дифференциации техногенного вещества по гранулометрическим типам учитываются при анализе распределения радиоактивных изотопов в окружающей среде (Bell et al., 1997; Environmental colloids ..., 2007; Markich et al., 2018). В целом, особенности дифференциации техногенных элементов во многом совпадают с соответствующими процессами в природных грунтах и осадках. Однако в конкретных условиях между ними выявляются и определенные различия. В частности, в определенных условиях техногенные компоненты могут концентрироваться в грунтах и осадках, достигая исключительно высокого уровня. Этот процесс может происходить одновременно с повышением концентрации и некоторых природных частиц. Основными механическими способами концентрации твердых техногенных частиц являются: гравитационный; косовой; сортировка по гидравлической крупности; волновой.

Заслуживают внимания процессы дифференциации техногенных составляющих в намывных техногенных массивах, сформированных из дисперсных горных пород или твердых отходов, уложенных способами гидромеханизации. Для таких объектов дифференциация вещества происходит в пляжной зоне с уменьшением размерности частиц с удалением от места сброса пульпы и внутри сформированного грунтового массива.

Указанные закономерности демонстрируют исследования автора по хвостохранилищу Качканарского ГОКа, где размещаются отходы обогащения титаномагнетитовых железных руд Гусевогорского месторождения. В толще дамб за счет процессов дифференциации вещества сформированы грунты с низкими

коэффициентами фильтрации, которые на отдельных участках выступают в качестве местного водоупорного слоя и играют роль в обводненности грунтового массива (рис.3).

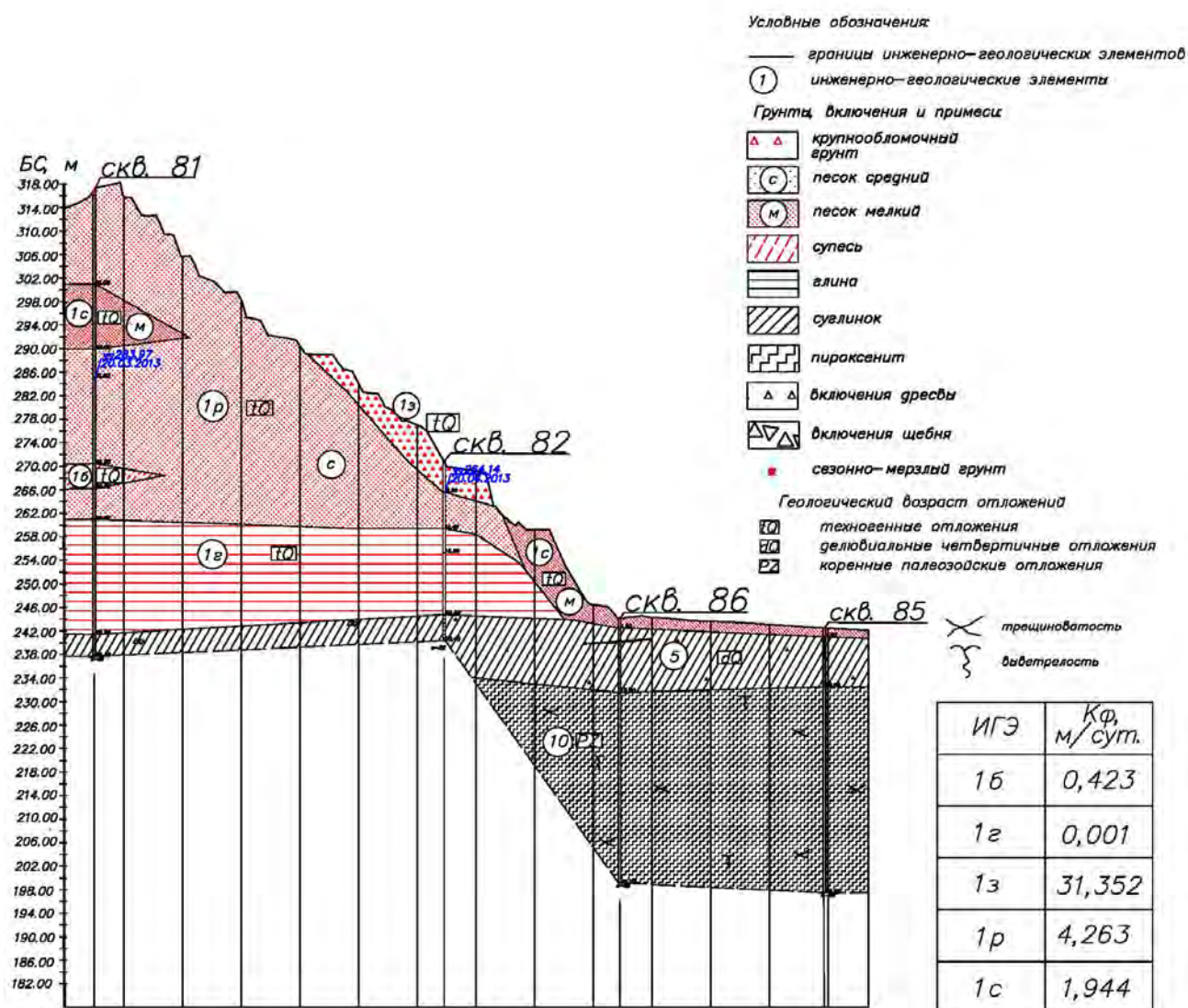


Рис.3. Строение грунтового массива хвостохранилища Качканарского ГОКа

Отдельного внимания заслуживают процессы дифференциации вещества техногенных массивов, содержащих ценные компоненты (золото, платиноиды, серебро, алмазы), где многочисленными исследователями отмечается формирование зон вторичного обогащения, что в конечном итоге позволяет рассматривать эти объекты в качестве потенциальных, а в отдельных случаях реальных рудных объектов (Макаров, 2001; Наумов, 2010; Литвинцев и др., 2016; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2019; Голдырев и др., 2021).

Физико-химические процессы концентрации техногенных элементов в грунтах и осадках обусловлены формированием в них соответствующих *геохимических барьеров*. Наиболее важными из них являются сорбционный, окислительный и восстановительный. Повышенные концентрации элементов техногенного происхождения формируются, прежде всего, в тонкодисперсных грунтах и осадках. При этом отмечено избирательное обогащение их определенными элементами в результате катионного обмена, адсорбции гидроксидами железа, марганца и алюминия, совместного осаждения, образования комплекс-органических соединений (Касимов и др., 1991; Кнатько и др., 2002; Опекунов, 2005; Филатова и др., 2016; Янин, 2020).

Биохимические механизмы концентрации химических элементов реализуются в органогенных грунтах и осадках (сапропелевых илах, торфах, почвах и др.). Важную роль в них играют процессы биогенной аккумуляции элементов из окружающей среды и биогенного минералообразования (Ильин, 1988; Кабата-Пендиас и др., 1989; Волошин, 2003; Радомская и др., 2019; Груздев и др., 2019; Опекунова и др., 2019). Особенно значительные накопления элементов происходят под влиянием деятельности микроорганизмов, которые способны разрушать различные искусственные органические вещества и высвобождать присутствующие в них редкие элементы (Евдокимова, 2014; Тимофеев и др., 2010).

В районах интенсивного техногенного загрязнения геологической среды и поверхностных вод происходят сложные *процессы современного природно-техногенного минералообразования*. Наиболее значительные по масштабам эти процессы отмечаются в водотоках, в местах сброса шахтных вод, в отвалах угольных шахт и отходов полиметаллических руд (Чесноков, 2001; Зверева, 2005; Потапов и др., 2007; Lottermoser, 2007; Юргенсон, 2010, 2018, 2020; Wei et al., 2016, 2017; Kefeni, 2017; Хусаинова и др., 2020; Голдырев и др., 2020 и др.).

Некоторые процессы природно-техногенного минералообразования развиваются и на значительном удалении от мест разработки полезных ископаемых. В частности, при транспортировке взвешенных и растворенных



техногенных веществ в водных потоках могут происходить сложные реакции и трансформации с образованием твердой фазы разного состава (España, 2005, 2007; Kumpulainen et al., 2006; Sahoo et al., 2012; Kupka et al., 2012; Valente et al., 2013, 2015; Carbone et al., 2013).

Ярким примером проявления таких процессов выступает территория Кизеловского угольного бассейна, где активно протекают процессы минералообразования при смешении шахтных вод с речными. В подавляющем большинстве алеврито-глинистый материал рек в зонах влияния шахтного самоизлива имеет ярко-оранжевый и ржавый цвет. Он отлагается на плесовых участках, а на перекатах покрывает грубообломочные отложения. Именно эта тонкодисперсная фаза осадков, сорбируя токсичные элементы, с одной стороны, обеспечивает процессы самоочищения воды, с другой – представляет собой источник негативного влияния на состав воды на участках активной аккумуляции (рис.4).

В кристаллической части этих осадков присутствуют вторичные минералы (%): гетит ( $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ) – до 15, ярозит ( $\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) – до 11, фельшебаниит ( $\text{Al}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_{10}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) – до 8, лепидокрокит ( $\gamma\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ) – до 4, диаспор ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) и копиапит ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2\cdot 20\text{H}_2\text{O}$ ) – до 2.

Большая часть вещества представлена аморфными гидроксидами железа. Значительные изменения происходят при вылеживании в отвалах шлаков металлургических производств – изменяются фазовый, минеральный и химический состав (Потапов и др., 2010; Подольский и др., 2014; Погромский и др., 2018, 2019). Эти процессы характерны и для шламов химических предприятий за счет процессов силикатного, марганцовистого, железистого распада с изменением дисперсности и даже агрегатного состояния. Отдельные компоненты шлака могут взаимодействовать с дождевой и талой водой, образуя новые соединения.

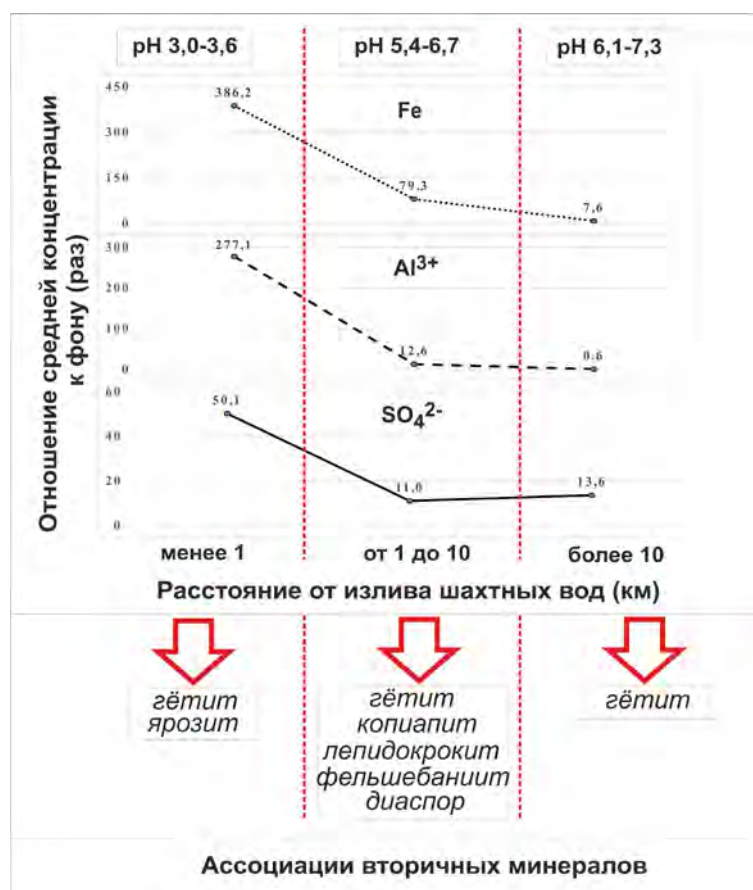


Рис.4. Соотношение состава речных вод и минерального состава донных отложений р.Косьвы на территории Кизеловского угольного бассейна

Таким образом, изучение вещественного состава техногенных продуктов в составе техногенных грунтов, процессов природно-техногенного седиментогенеза является эффективным способом познания процессов их формирования, изменения во времени, оценки практического и экологического значения, вкладом в развитие генетического подхода к изучению грунтов в инженерно-геологических и инженерно-экологических целях.

**2. Миграционная способность техногенных компонентов (механическая, физико-химическая и биогеохимическая) определяет зоны влияния горнопромышленных территорий на прилегающие районы.**

Зоны распространения различных техногенных компонентов занимают все большие территории. Все формы миграции техногенных компонентов можно объединить в три большие группы: механические, физико-химические и биогеохимические.

В соответствии с разнообразием природных обстановок на Земном шаре могут быть выделены следующие основные **формы механической миграции** техногенных частиц: перенос временными потоками (сели, дождевые потоки); транспортировка в речных системах; перемещение волнами на побережьях морей и озер; перемещение морскими течениями и турбидитными потоками; перенос ветром; перенос льдом.

**Физико-химическая миграция** элементов техногенного происхождения совершается преимущественно в водной среде в двух основных формах – в виде истинных растворов и в составе коллоидных растворов. Выпадение техногенного вещества из истинных или коллоидных растворов с образованием природно-техногенных коллоидных минералов происходит на различных физико-химических барьерах.

Для горнопромышленных территорий большое значение имеют процессы миграции вещества техногенных массивов: *в результате ветровой эрозии* открытых поверхностей горных выработок и объектов размещения отходов (отвалов, хвостохранилищ), в процессе выполнения технологических операций (бурение, взрывание, выемка, погрузка, транспортировка, дробление); *с фильтрационными потоками* сточных вод; *проранами и аварийными разливами* (Mittal et al., 1976; Klohn, 1979; Kossoff et al., 2014; Aboelela et al., 2016; Cheng et al., 2016; Naeini et al., 2018; Shen et al., 2011; Lyu et al., 2019). В целом накопление техногенного вещества в объектах размещения отходов идет интенсивнее, чем его атмосферное и гидрогенное рассеивание (Грязнов и др., 2003).

**Биогеохимическая миграция** техногенного вещества по масштабам значительно уступает первым двум группам. Она играет большую роль в почвенных горизонтах (Глазовская, 1992; Перельман, 1978; Касимов, 2013; Водяницкий, 2017).

*К факторам механической миграции техногенных частиц* относятся параметры и условия, влияющие на скорость и дальность их переноса в конкретной среде. При всем разнообразии их можно объединить в три группы:

✓ динамические параметры среды транспортировки (скорость водного или воздушного потоков, водообильность, турбулентность течения, интенсивность волнения на берегах морей и озер и т.п.);

✓ физико-химические свойства техногенных продуктов (растворимость в воде, плотность, твердость, размер и форма частиц, смачиваемость, хрупкость, вязкость, спайность, устойчивость к агентам химического выветривания и др.);

✓ физико-географические и геолого-геоморфологические условия среды осадконакопления (климат, неотектонический режим, ландшафт, растительность).

*Факторы физико-химической миграции элементов* включают:

✓ критерии состояния среды миграции (кислотно-щелочные (величина pH) и окислительно-восстановительные (значение Eh) условия, температура, газовый состав);

✓ форму нахождения химического элемента (ионы, мицеллы, легко или трудно растворимые соединения).

Для *биогеохимической формы* важнейшими факторами миграции элементов являются особенности окружающей среды – ее окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные условия, состав микроорганизмов и флоры, биогенная аккумуляция вещества.

Наиболее распространенной формой миграции техногенного вещества является *миграции в долинах рек*. Здесь перенос вещества осуществляется в различных формах: во влекомом состоянии (в активном слое донных наносов), волочением и перекачиванием по дну, сальтацией и во взвеси. Установлено, что техногенные частицы, прежде всего, насыщают верхнюю часть активного слоя донных наносов. С глубиной их содержание уменьшается, а в «мертвом» горизонте голоценового аллювия они практически отсутствуют. Это объясняется более молодым возрастом осадков активного слоя, который согласуется с временем активной техногенной деятельности. В ходе миграции происходят процессы концентрации и разубоживания техногенных частиц в осадках, их сортировки по гидравлической крупности, дробления и истирания, растворения, выветривания и др.

Важнейшей количественной характеристикой миграции техногенных частиц может служить их миграционная способность, которая в общем случае является функцией плотности, размеров, формы, твердости, спайности, хрупкости, степени смачиваемости и растворимости частиц (Кухаренко, 1961; Осовецкий, 1986). Значительная группа факторов, определяющих миграционную способность зерен в речном потоке, может быть учтена одним интегрирующим показателем – их гидравлической крупностью, т.е. скоростью свободного падения в воде. Адаптированная формула для количественных расчетов миграционной способности техногенных частиц с упрощением методики расчетов имеет вид:

$$L_t = k \frac{D_{\text{усл}}}{W_{\text{yc}}},$$

где  $D_{\text{усл}}$  – значение относительной твердости условного зерна данного техногенного вида;  $W_{\text{усл}}$  – значение гидравлической крупности условного зерна среднего диаметра 1 мм, см/с;  $k$  – нормирующий коэффициент.

Физический смысл показателя  $L_t$  (размерность, с/см) – время (в секундах), за которое техногенная частицы проникнет в осадок на глубину, равную 1 см. Чем больше эта глубина, тем ниже миграционная способность частицы (способность перемещаться вниз по течению). Рассчитанные для разных техногенных видов в составе речных осадков территории Уральского региона значения  $L_t$  приведены в табл.3.

*Миграция во взвеси* определяет перенос огромного количество техногенных продуктов – золы, угля, пластмасс, шлака, стекла, органики и т.д. Важность данного вида миграции для редких элементов особенно значительна: считается, что в речных взвесах переносится основная масса практически всех редких металлов (Landa et al., 1995; Menon et al., 1998; Малиновский и др., 2002; Owen et al., 2000).

Техногенные частицы в составе взвесей, прежде всего, отличаются небольшими размерами (в основном меньше 100 мкм), малой плотностью и обычно сильно уплощенной формой. Особенности миграции техногенных частиц в составе взвесей определяются также такими факторами, как физико-химические свойства водной среды, свойства поверхности частиц.

Табл.3. Показатели миграционной способности техногенных частиц в составе речных осадков Уральского региона

| Вид техногенных частиц         | Значение гидравлической крупности для частицы $d=1$ мм, см/с | Средняя твердость частиц, баллы шкалы Мооса | Значение миграционной способности $L_t$ , с/см |
|--------------------------------|--|---|--|
| Уголь «легкий»                 | 1,35   | 2   | 1,48   |
| Уголь «тяжелый»                | 3  | 2,6   | 0,87   |
| Металловидный магнитный шлак   | 9,52   | 5   | 0,53   |
| Металловидный немагнитный шлак | 3,35   | 4,6   | 1,37   |
| Стекловидный шлак              | 7,87   | 4,5   | 0,57   |
| Кирпич                         | 8,09   | 4   | 0,49   |
| Стекловидные шарики            | 12,5   | 5   | 0,40   |
| Полимерные шарики (р. Исеть)   | 6,18   | 1   | 0,16   |
| Магнитные сферулы              | 17,2   | 4,6   | 0,27   |

Во взвесах существенно увеличивается доля природно-техногенных агрегатов. Многие природные минеральные частицы (особенно глинистые частицы, аморфные агрегаты гидроксидов железа, карбонаты) сорбируют техногенные элементы из водной среды. В результате природные зерна покрываются оболочками разной толщины, концентрирующими в больших количествах элементы техногенного происхождения. Доля техногенного материала во взвесах рек сильно варьирует в зависимости от интенсивности производственной деятельности, объема выбросов и сбросов, вещественного состава отходов производства и потребления, удаленности от источника поступления.

Основными зонами миграции техногенных частиц в морских обстановках являются морские побережья и морские течения. Морские волны являются мощным агентом транспортировки техногенного материала вдоль берега в направлении преобладающих ветров. Одновременно с этим происходит истирание частиц малой абразивной прочности, их окатывание, дробление зерен по трещинам или плоскостям спайности, сортировка по гидравлической крупности. Важным фактором миграции техногенных продуктов на шельфе

является скорость осадконакопления. При высоких темпах отложения осадка на шельфе техногенные продукты накапливаются в нем, при низких – выносятся в другие зоны и разубоживаются. Другим важным фактором является динамика водной среды. В зонах сильного течения наблюдается значительный транзит техногенного материала и затем его накопление в благоприятных зонах с достижением высоких уровней концентрации.

*Миграция твердых техногенных продуктов в атмосфере* определяется объемами выбросов твердых веществ от стационарных источников (для РФ это до 25% от общего объема выбросов). В общем цикле миграции атмосферному переносу твердых техногенных веществ придается большое значение. Все многообразие осаждающегося техногенного материала аэрозолей можно подразделить на три типа: 1) обусловленные промышленными выбросами (преимущественно металлургических предприятий) с преобладанием в составе рудной пыли, углистых и графитовых частиц, частиц цветных металлов, оксидов и гидроксидов железа и марганца; 2) связанные с коммунальными и бытовыми отходами (синтетические волокна, частицы краски, стекла, кирпича, золы и др.); 3) обусловленные загрязняющими атмосферу нефтепродуктами, исходящими от транспорта и судоходства.

Одним из основных источников поступления техногенных твердых продуктов в атмосферу являются отвалы горнообогатительных комбинатов. В сухую погоду за счет воздушной миграции вещества зона их влияния на прилегающие территории составляет до 5–10 км, что демонстрируют исследования вещественного состава грунтов и осадков. Способом оценки дальности перемещения техногенного вещества в воздушной среде являются исследования снежного покрова на прилегающих территориях (рис.5).

*Физико-химическая миграция техногенного вещества.* Значительная часть техногенного вещества способна растворяться в воде и переносится в виде истинных растворов. Особенно это относится к солеотвалам, обогащенным галитом, отвалам комбинатов по добыче нитратных солей (Бачурин, 2006; Лискова, 2017; Хайрулина, 2018; Янин, 2019).



*Рис.5. Распределение содержания хлоридов в снежном покрове в зоне влияния рудоуправлений Верхнекамского месторождения солей*

В отвалах многих горнодобывающих предприятий почти всегда часть вещества сравнительно быстро растворяется в воде. Признаком его миграции в составе истинных растворов является резкое увеличение минерализации вод на территориях градопромышленных агломераций и горнодобывающих предприятий, а также изменение гидрохимической фации (Катаев и др, 2006; Зинюков, 2006; Злобина и др., 2017; Хасанова и др., 2019; Белкин и др., 2018; Ксенофонтова, 2021).

Промышленные стоки содержат повышенное количество анионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{HSiO}_3^-$ , катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , из малых элементов – Cu, Pb, Zn, As, Mo, Ni, Cd, Hg, а также фосфатов, цианидов, фенолов, бензола, нефтепродуктов и др. Миграция техногенного вещества в виде истинных растворов определяется ландшафтно-климатической обстановкой. В аридных зонах выпадение солей из высокоминерализованных растворов с участием техногенного вещества происходит в непосредственной близости от промышленных и горнодобывающих предприятий (испарительный геохимический барьер).

В зонах поступления кислых шахтных вод значительная часть атомов



железа мигрирует в составе коллоидных растворов. Этот способ миграции характерен для соединений марганца, алюминия, серы, органических веществ. Благодаря явлению сорбции коллоиды способны поглощать большое количество (Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, V, Mo, U, Th, Hg и др.) и накапливать их в составе гелей, а затем и коллоидных минералов.

Таким образом, размеры зон влияния горнопромышленных территорий определяются миграционной способностью техногенных компонентов. Основными формами миграции техногенных компонентов являются механическая и физико-химическая. Зоны распространения техногенных грунтов занимают огромные территории и демонстрируют пространственную динамику развития ЛТС (рис.6).



Рис.6. Схема развития литотехнической системы

**3. Мониторинг литогенной основы ПТС горнопромышленных территорий включает системные исследования состава техногенных грунтов, в том числе и в зоне потенциального воздействия ПТС – техногенной ассоциации компонентов (их устойчивости и токсичности), техногенно-геохимических ассоциаций элементов, процессов минералообразования.**

Оптимальное функционирование ПТС достигается сочетанием необходимых параметров технической составляющей с требованиями к охране окружающей среды. На современном этапе изучение ПТС как результата трансформации окружающей среды позволяет оценить последствия производственно-хозяйственной деятельности человека и получить необходимую информацию для разработки природоохранных мероприятий. Способом получения оперативной информации, которая выступает основой разработки мероприятий по управлению ПТС, выступает мониторинг, а с учетом конкретизации и отражения специфики исследуемого компонента ПТС – литомониторинг или мониторинг геологической среды.

Целью мониторинга геологической среды является установление тенденций развития геологической среды (или ее части в пределах ПТС) и принятия на основе этого управленческих решений по оптимизации функционирования ПТС (Трофимов и др., 2018). Методология мониторинга ПТС представлена в работах Л.В.Бахировой (1989), Г.К.Бондарика (2004 и др.), А.Н.Галкина (2012 и др.), А.Г.Гамбурцева (1994), Г.А.Голодковской (1999), М.В.Графкиной (2008), О.М.Гуман (2008), В.К.Епишина (1985), А.П.Камышева (1999), В.А.Королева (2007), В.Д.Ломтадзе (1976), И.И.Мазура (1999), В.И.Осипова (2010), В.В.Пендина (2008), В.И.Теличенко (2001), А.Л.Рогозина (1993), В.Т.Трофимова (2006 и др.), Л.Чан Мань (1998) и др.

ПТС, формирующиеся в горнодобывающих районах, являются объектами повышенного экологического внимания в связи со значительным техногенным преобразованием всех компонентов природной среды. Их состояние среди прочих составляющих определяется свойствами литогенного ресурса, которым для территорий горной добычи выступают многотоннажные отходы – породы вскрыши и отходы обогащения полезных ископаемых. Многоплановое изучение грунтов с инженерно-геологических и эколого-геологических позиций направлено на обеспечение устойчивого функционирования ПТС.

Многообразие состава, строения, состояния и свойств грунтов в прикладной отрасли инженерных изысканий оцениваются различными показателями,

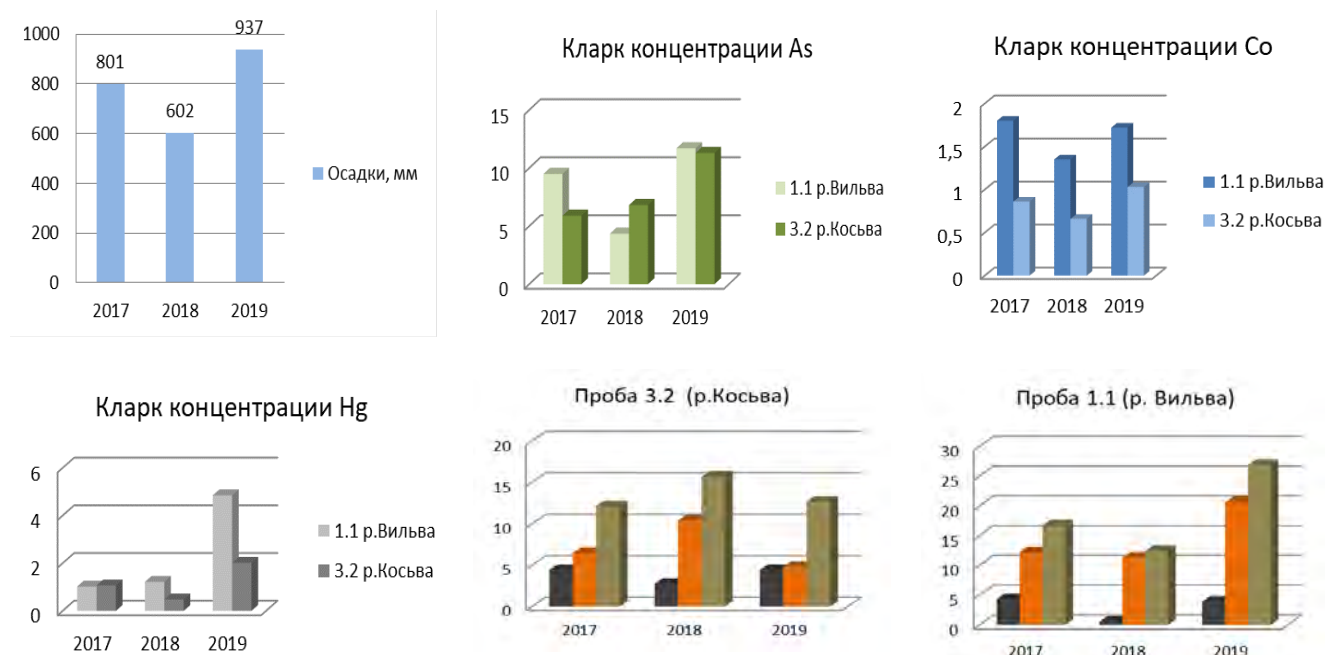
реальное сочетание которых огромно. С появлением нового научного оборудования, теоретических взглядов, потребностей практики неизбежно будут появляться новые результаты о характеристиках грунтов. В рамках задачи расширения учитываемых компонентов для оценки масштабов техногенного преобразования геологической среды в программы литомониторинга ПТС (ЛТС) горнопромышленных территорий должны включаться следующие исследования специфики вещественного состава грунтов и осадков, в том числе и в зоне потенциального воздействия ПТС: техногенной ассоциации компонентов (их устойчивость и токсичность); техногенно-геохимических ассоциаций элементов; развитие минералообразования, которое с одной стороны, обеспечивает процессы самоочищения, с другой – представляет собой источник вторичного загрязнения на участках активной аккумуляции.

Эта информация позволит более детально обосновать границы и область допустимых состояний ПТС (предельно допустимых концентраций, уровней, нагрузок и др.), прогнозировать состояние геологической среды в ходе природной эволюции и прогрессирующем техногенном воздействии. Результаты таких исследований являются вкладом в развитие теории ПТС, способствуют накоплению научных знаний об объекте, в том числе в важнейшей сфере предельно допустимых техногенных нагрузок на геологическую среду, выступают основой теории и технологий управления ПТС.

Изложенное демонстрируют работы на территории Кизеловского угольного бассейна, которые можно рассматривать как пример современных комплексных исследований вещественного состава грунтов в совершенствование комплексных литомониторинговых исследований горнодобывающих ЛТС. При реализации исследований использованы минералогические и геохимические данные, детально описаны и изучены техногенные компоненты в донных отложениях.

Наиболее показательными являются результаты изучения химического состава донных отложений, в которых присутствуют токсичные элементы (As, Sb, Cu, Zn, Pb, Hg, Ni, Co, Se). Сравнение данных литомониторинговых наблюдений позволило выявить отдельные направленные тренды изменения количественного

содержания элементов. В основном для большинства элементов прослеживается тенденция периодического изменения концентраций, что обусловлено интенсивностью поступления загрязняющих веществ и активностью водной миграции вещества за счет величины стока, связанного с количеством атмосферных осадков (рис.7).



Содержание техногенных частиц, %:

■ Уголь    ■ Охры    ■ Общее содержание техногенных частиц

*Рис.7. Соотношение среднегодовой величины атмосферных осадков, концентрации токсичных элементов и техногенных компонентов в аллювиальных осадках Кизеловского угольного бассейна*

Постоянное присутствие на данной территории источников поступления техногенного вещества в сочетании с периодически изменяющимся водным режимом рек неизбежно будет приводить в отдельные годы к появлению высоких концентраций в донных отложениях токсичных элементов (особенно As, Cu, Zn, Pb) и техногенных частиц, среди которых ведущую роль играют охры. Наиболее высокую нагрузку испытывает бассейн р. Вильвы.

Таким образом, изучение процессов трансформации вещественного состава литогенной основы ПТС позволяет оценить последствия производственно-

хозяйственной деятельности человека и получить информацию для разработки мероприятий по снижению ее негативных экологических последствий.

#### **4. Технологии снижения негативных экологических последствий техногенных изменений геологической среды горнопромышленных территорий, включающие использование техногенных грунтов в качестве полезных ископаемых и направления рекультивации техногенных массивов с учетом оценки потенциала их самовосстановления.**

Вовлечение в разработку месторождений со сложными горно-геологическими условиями и труднообогатимыми рудами, широкое использование оборудования с высокой производительностью определяют формирование значительных объемов отходов горного производства. При этом низкий уровень комплексного использования минерального сырья и технологические потери руд при добыче и переработке приводят к поступлению в объекты размещения отходов ценных компонентов. Многие техногенные массивы объектов размещения отходов горной добычи являются потенциальными техногенными месторождениями строительных материалов, ценных металлов, химического сырья (Илимбетов и др., 2008; Селезнев и др., 2011; Z. Bian et al., 2012; Усманова, 2014; Ежов, 2016; Макаров и др., 2018; Квятковский и др., 2017; Каминский, 2018 и др.).

#### **Использования техногенных грунтов в качестве полезных ископаемых.**

В РФ в отвалах и хвостохранилищах находится около 80 млрд т отходов от добычи и переработки полезных ископаемых (Мустафин, 2012). В настоящее время основное направление практического использования таких отходов – применение в качестве *строительных материалов*. Значительная часть техногенных грунтов и осадков представляет собой потенциальные полезные ископаемые. Наиболее важными из них являются *техногенные россыпи золота, платиноидов* (Избеков и др., 1992; Шило, 2002; Наумов, 2010 и др.). Перспективны техногенные массивы (в частности отвалы Кизеловского угольного бассейна, глинисто-солевые шламы и солеотвалы ВКМКС) с содержанием Li, Sc, Ge, Ga и др. элементов, востребованных в высокотехнологичных отраслях

промышленности.

Природно-техногенные месторождения необходимо оценивать традиционными методами разведки, адаптированными к конкретным условиям залегания. Разведке предшествует опережающее геолого-технологическое опробование техногенных массивов, целью которого является изучение технологических свойств вмещающих материалов и анализ распределения в них ценных компонентов.

По результатам опробования составляется баланс распределения ценных составляющих по продуктам обогащения, определяется их общее количество, извлечение в отдельные продукты обогащения. При этом рекомендуется изучить и возможность получения дополнительных товарных продуктов, установить минимальное извлекаемое коммерческое содержание. Примером реализации таких подходов являются исследования отходов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа (рис.8).

Перспективным направлением использования отдельных многотоннажных отходов горной добычи являются технологии каменного литья и производство минеральных волокон (Игнатова, 2013; Мелконян и др., 2016; Худякова, 2017). Разработка техногенных месторождений позволяет расширить сырьевую базу горно-металлургической, угольной и горно-химической отраслей промышленности.

В рассматриваемом ключе лежит и популярный зарубежный подход – «urban mining», когда техногенные отвалы рассматриваются как месторождения будущих ресурсов с оценкой отложенного ресурсного потенциала уже на этапе проектирования производства (Мякишева и др., 2016; Schiller et al., 2016; Park et al., 2017).

**Направления рекультивации техногенных массивов.** ПТС горнодобывающих районов являются объектами повышенного экологического внимания в связи со значительным техногенным преобразованием всех компонентов природной среды.



*Рис.8. Технологическая схема переработки хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа*

Значительная часть нарушенных территорий длительное время подвержена негативным последствиям в почвенно-экологическом, геоботаническом, общеэкологическом и санитарно-гигиеническом планах (Шабанов и др., 2020; Karaca et al., 2018; Raischi et al., 2019), особенно в случае складирования токсичных отходов (Рыльникова и др., 2020; Стровский и др., 2018; García-Giménez et al., 2017; Khayrulina et al., 2018). В результате складирования отходов формируется комплекс техногенных отложений, который постепенно начинает выполнять функции почвы и определяет условия обитания живых организмов (Андрюханов, 2004; Zamotaev, 2017; Петрова и др., 2021), прежде всего, растительности.

Основой реализации рекультивационных мероприятий техногенных массивов выступают специальные исследования грунтов с определением их

основных агрохимических (содержание органического вещества и общего азота, гидролитическая кислотность, емкость катионного обмена, рН водной и солевой вытяжек, содержание подвижного калия и обменного натрия, нитратного азота) и экологических (валовое содержание Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, As, Hg) характеристик, установлением признаков почвообразования, оценкой их фитотоксичности, что позволяет выявить необходимость проведения рекультивационных работ.

Активное протекание лесовосстановительных процессов на отдельных техногенных массивах с удовлетворительным состоянием растительного покрова демонстрируют отсутствие негативного воздействия указанных отложений на растительность. Вслед за восстановлением растительного покрова в них появляются признаки начального почвообразования – образование лесной подстилки, накопление органического вещества и начальная дифференциация почвенных горизонтов. Почвенно-экологическое состояние таких ПТС является удовлетворительным, не требующим проведения специальных природоохранных мероприятий по восстановлению почвенного и растительного слоя.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Настоящая диссертационная работа детализирует особенности механизмов формирования состава техногенных грунтов горнопромышленных территорий и является вкладом в изучение техногенно-измененной геологической среды, анализируемой через универсальную концепцию природно-технических систем. Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом.

1. Центрами активного влияния человека на геологическую среду, прежде всего, являются горнодобывающие районы, где сосредоточено множество добывающих и перерабатывающих предприятий с мощной инфраструктурой обслуживания. Территории с развитием горнодобывающего профиля производства выступают зонами активного формирования техногенных грунтов, что продемонстрировано автором на примере исследований литогенной основы ПТС Кизеловского угольного бассейна, Верхнекамского месторождения



калийно-магниевых солей, хвостохранилищ Качканарского и Костомукшского ГОКов.

2. Наиболее значительные массы техногенных грунтов в ЛТС горнопромышленных территорий создаются непосредственно в результате разработки месторождений полезных ископаемых, переработки минерального сырья, проведения строительных работ, рекультивационных мероприятий, дноуглубительных работ в долинах рек. Для горнодобывающих территорий особого внимания заслуживают группы *техногенно-перемещенных* (массы пород, технически перемещенные без заметного изменения их вещественного состава) и *техногенно-преобразованных* (отходы, сформированные в процессе горнодобывающей деятельности, технологических операций – классификации, сортировки, обогащения) *грунтов*.

3. Процессы формирования техногенных грунтов, обусловленные техногенным перемещением масс горных пород, их техногенным преобразованием в процессе горнодобывающей деятельности и различных технологических операций, физической и физико-химической трансформации, размещением в геологической среде масс промышленных отходов, в аспекте развития геологической среды являются процессами природно-техногенного седиментогенеза.

4. Важнейшим фактором, определяющим соотношение между природной и техногенной составляющими в составе грунтов, является уровень техногенной нагрузки, анализируемый в исследовательской практике через показатель модуля техногенной нагрузки, состав техногенной ассоциации компонентов и техногенно-геохимической ассоциации элементов, которые определяются характером производственной деятельности.

5. Процессы природно-техногенной седиментации, на первом этапе включают *процессы интеграции* – смешение разнородного материала из разных источников. Соотношение техногенных продуктов в грунтах прямо пропорционально объемам их локальных поступлений за вычетом легко растворимых и плавучих компонентов. Наиболее сложные и разнообразные

ассоциации техногенных компонентов отмечаются в зонах проявления аккумуляционных процессов – прудах, реках, водохранилищах.

6. В процессе природно-техногенной седиментации реализуются *процессы дифференциации техногенных компонентов*, которые сводятся к закономерному перераспределению техногенных частиц в грунтах и осадках по гранулометрическим фракциям. Размер техногенных частиц является одним из важнейших факторов, определяющих их распределение в грунтовом массиве.

7. Зоны распространения техногенных грунтов занимают огромные территории и демонстрируют пространственную динамику развития ЛТС. Размеры зон влияния горнопромышленных территорий определяются миграционной способностью техногенных компонентов. Основными формами миграции техногенных компонентов являются механическая и физико-химическая. Среди исследованных объектов наибольшей зоной влияния (с учетом активного проявления седиментационных процессов – около 100 км) характеризуется ПТС Кизеловского угольного бассейна.

8. Многоплановое изучение грунтов как литогенного ресурса ПТС с оценкой техногенной ассоциации компонентов (их устойчивости и токсичности), техногенно-геохимических ассоциаций элементов, процессов минералообразования в рамках специальных программ литомониторинга направлено на обеспечение устойчивого функционирования ЛТС. Эта информация позволяет более детально обосновывать области допустимых состояний ПТС, прогнозировать состояние геологической среды в ходе природной эволюции и прогрессирующего техногенного воздействия.

9. Специальные исследования техногенных массивов с определением основных агрохимических характеристик слагающих их грунтов, установлением признаков почвообразования, оценкой их фитотоксичности, выступают основой проведения на них рекультивационных работ, позволяют оценить потенциал их восстановления. Они являются актуальным направлением прикладных работ для объектов накопленного экологического ущерба, которые позволяют получить существенный экономический эффект за счет сокращения расходов на

природоохранные мероприятия для таких объектов.

10. Внедрение технологических схем использования вещества техногенных массивов, основанных на современных технологиях переработки отходов с максимальным извлечением ценных продуктов (Au, платиноидов, Zr, Sc, Li, Ge и др.), перспективных технологиях каменного литья и минеральных волокон с производством уникальных композиционных материалов, развитие подхода «urban mining», когда техногенные отвалы рассматриваются как месторождения будущих ресурсов с оценкой отложенного ресурсного потенциала уже на этапе проектирования производства, являются важными направлениями снижения негативных экологических последствий техногенного изменения геологической среды горнопромышленных территорий.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. **Меньшикова, Е.А.** Магнитные сферулы речных осадков Уральского региона / Е.А.Меньшикова, Б.М.Осовецкий // Бюл. МОИП. – Отд. геол. – 2010. – Т.85, вып.6. – С.57–62.

2. Батурин, Е.Н. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира / Е.Н.Батурин, **Е.А.Меньшикова**, С.М.Блинов, Д.Ю.Наумов, П.А.Белкин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – С.613–613.

3. Ворончихина, Е.А. Технофильные металлы в естественных и урбанизированных экосистемах Пермского края / Е.А.Ворончихина, С.М.Блинов, **Е.А.Меньшикова** // Экология урбанизированных территорий. – 2013. – №1. – С.103–108.

4. **Меньшикова, Е. А.** Исследование пород Пермского края для оценки их пригодности как сырья для производства базальтового волокна [Электронный ресурс] / Е.А.Меньшикова, К.П.Казымов, Г.А.Исаева, Т.В.Манькова, К.А.Мещеряков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7641>.

5. Перевозчиков, Б.В. Оценка пригодности меланократового базальта для производства минерального волокна [Электронный ресурс] / Б.В.Перевозчиков, Б.М.Осовецкий, **Е.А.Меньшикова**, К.П.Казымов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №2. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8924>.

6. **Меньшикова, Е.А.** Углистые частицы в окружающей среде / Е.А.Меньшикова, Б.М.Осовецкий // Проблемы региональной экологии. – №5. – 2014. – С.83–88.

7. **Меньшикова, Е.А.** Магнитные сферулы природно-техногенных осадков [Электронный ресурс] / Е.А.Меньшикова, Б.М.Осовецкий // Современные

проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18203>.

8. Блинов, С.М. О составе снега на территории Верхнекамского солевого месторождения / С.М.Блинов, **Е.А.Меньшикова**, Е.Н.Батулин, Е.С.Ушакова, Л.Р.Золотарев // Лед и снег. – 2015. – №1. – С.121–128. (**Scopus**)

9. **Меньшикова, Е.А.** Экологическое состояние грунтов городских территорий Пермского края / Е.А.Меньшикова, В.И.Ждакаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – №4. – С.124–132. – DOI: 10.15593/2409-5125/2017.04.10.

10. Шильяев, А.И. Диабазы Дагестана – источник сырья для производства базальтового волокна / А.И.Шильяев, Е.В.Беляев, У.К.Калабеков, **Е.А.Меньшикова** // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2018. – №11–12 (238–239). – С.37–41.

11. Блинов, С.М. Использование отходов предприятий Пермского края / С.М.Блинов, **Е.А.Меньшикова** // Вестник Пермского университета. – Геология. 2019. – Т.18. – №2. – С.179–191. – DOI:10.17072/psu.geol.18.2.179.

12. **Меньшикова, Е.А.** Радиационные исследования отвалов Кизеловского угольного бассейна / Е.А.Меньшикова, С.М.Блинов, Д.А.Белышев, Р.Д.Перевощиков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – №4 (56). – С.81–89. – DOI: 10.21440/2307-2091-2019-4-81-89.

13. **Меньшикова, Е.А.** Особенности оценки состояния грунтов в практике инженерно-экологических изысканий / Е.А.Меньшикова, Т.И.Караваева // Инженерные изыскания. – 2019. – Т.13. – №4. – С.16–23. – DOI: 10.25296/1997-8650-2019-13-4-16-23.

14. **Меньшикова, Е.А.** Исследования литотехнических систем горнопромышленных территорий / Е.А.Меньшикова // Вестник Пермского университета. – Геология. – 2021. – Т.20. – №2. – С.125–141. – DOI: 10.17072/psu.geol.20.2.125.

15. **Меньшикова, Е.А.** Особенности грунтов и потенциал восстановления природно-технической системы «Хвостохранилище Качканарского ГОКа» / Е.А.Меньшикова, Т.И.Караваева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №9. – С.54–66. – DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3353. (**Scopus**)

*Статьи в рецензируемых изданиях в Scopus и WoS*

16. Pisciotta, A. Quality Assessment of Melanocratic Basalt for Mineral Fiber Product, Southern Urals, Russia / A.Pisciotta, B.V.Perevozhchikov, B.M.Osovetsky, **Е.А.Menshikova**, K.P.Kazymov // Natural Resources Research. – 2015. – 24. – P.329–337. – DOI: 10.1007/s11053-014-9253-9. (**Scopus**)

17. **Menshikova, E.** Mineral Formation under the Influence of Mine Waters (The Kizel Coal Basin, Russia) / E.Menshikova, B.Osovetsky, S.Blinov, P.Belkin // Minerals. – 2020. – 10. – 364. – DOI: 10.3390/min10040364. (**Web of Science**)

18. Fetisov, V.V. Evaluation and Prediction of Seepage Discharge Through Tailings Dams When Their Height Increases / V.V.Fetisov, **Е.А.Menshikova** // In: De

Maio M., Tiwari A.K. (eds) Applied Geology: Approaches to Future Resource Management. – 2020. – Springer Nature Switzerland AG. – DOI: 10.1007/978-3-030-43953-8\_2. (**Scopus**)

19. **Menshikova, E.** Reducing the Negative Technogenic Impact of the Mining Enterprise on the Environment through Management of the Water Balance / E.Menshikova, V.Fetisov, T.Karavaeva, S.Blinov, P.Belkin, S.Vaganov // Minerals. – 2020. – 10. – 1145. – DOI:10.3390/min10121145. (**Web of Science**)

20. **Menshikova, E.** Concentrations of Natural Radionuclides (40K, 226Ra, 232Th) at the Potash Salts Deposit / E.Menshikova, R.Perevoshchikov, P.Belkin, S.Blinov // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – 22(3). – P.179–187. – DOI: 10.12911/22998993 /132544. (**Scopus**)

21. **Menshikova, E.** Dumps of the Kizel Coal Basin as a Potential Source of Rare and Rare-Earth Elements / E.Menshikova, S.Blinov, P.Belkin, I.Ilaltidinov, M.Volkova // In: Rocha A., Isaeva E. (eds) Science and Global Challenges of the 21st Century - Science and Technology. Perm Forum 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 342. – Springer, Cham. – DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1\_35. (**Scopus**)

*Научные монографии*

22. Осовецкий Б.М. Природно-техногенные осадки / Б.М.Осовецкий, **Е.А.Меньшикова**. – Пермь, 2006. – 208 с.

*Патенты*

23. Пат. RU 2 762 631С1. Способ отбора донных осадков для экологических исследований и устройство для его осуществления / С.С.Ваганов, Р.Д.Перевошиков, **Е.А.Меньшикова**, Е.С.Ушакова; заявитель и патентообладатель ПГНИУ. – 2021118330; заявл. 21.06.2021; опубл. 21.12.21, Бюл. № 36.