

На правах рукописи



Прохоров Дмитрий Олегович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
ДЛЯ ОСВОЕНИЯ И КОНСЕРВАЦИИ РЕСУРСОВ ТЕХНОГЕННЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО РЕГИОНА**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Тула - 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**КАЧУРИН Николай Михайлович**

Официальные оппоненты:

**ХОРЕШОК Алексей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», научный руководитель горного института;

**КАЗАНИН Олег Иванович**, доктор технических наук, доцент, профессор РАН, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», декан горного факультета;

**АБРАМКИН Николай Иванович**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», профессор кафедры «Промышленное гражданское и подземное строительство».

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Защита диссертации состоится «12» февраля 2025 г. в 14 час 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.417.05 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 90, 6-й уч. корпус, ауд. 220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, Ученый совет ТулГУ, факс: (4872)35-81-81.

Автореферат разослан «08» ноября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Галина Викторовна  
Стась

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Объем и разнообразие минерально-сырьевых ресурсов – это существенное конкурентное преимущество Российской Федерации на мировой арене. Добывающая отрасль является важнейшей составляющей экономики государства. При этом добыча полезных ископаемых сопровождается накоплением большого объема отходов производства.

В самые сложные периоды истории – при реализации плана ГОЭЛРО, военные и послевоенные годы – увеличивались объемы добычи полезных ископаемых и создавалась энергетическая мощь страны. Технологии того времени не позволяли осуществлять комплексное освоение недр и сопровождалось большими потерями основного полезного ископаемого. При реструктуризации угольной отрасли и последующей ликвидации угледобывающих предприятий в ряде угольных бассейнов мероприятия, направленные на охрану окружающей среды, не проводились или были осуществлены не в полной мере. В результате прошлой экономической деятельности было сформировано большое количество техногенных минеральных образований (ТМО), которые сейчас, при использовании возможностей современных технологий и экономической целесообразности извлечения полезных компонентов, необходимо рассматривать как техногенные месторождения (ТМ).

Для выбора приоритетных технологических решений, направленных на освоение и сохранение ресурсов техногенных месторождений, особое внимание должно быть уделено разработке научно обоснованных подходов к оценке их безопасности для окружающей среды. Очевидно, что достоверные способы такой оценки должны базироваться на результатах изучения взаимодействия техногенных месторождений с окружающей средой как элементов единой системы. Для обоснования технологических решений по освоению и сохранению ресурсов ТМ важно учитывать весь комплекс параметров, характеризующих техногенные месторождения, окружающую среду и их взаимное влияние. Это позволит в каждом угледобывающем регионе определить приоритетные объекты как совокупность техногенных месторождений с прилегающими территориями и отдать предпочтение наиболее эффективным и безопасным технологиям их отработки и консервации. Поэтому исследования, посвященные обоснованию технологических решений для освоения и консервации ресурсов техногенных месторождений угледобывающего региона на основе оценки их воздействия на окружающую среду, являются актуальными.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в изучение проблем освоения техногенных месторождений и их воздействия на окружающую среду внесли такие ученые, как Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Галченко Ю.П., Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Малышев Ю.Н., Секисов А.Г., Пашкевич М.А., Мельник В.В., Зубова Л.Г., Соколов Э.М., Качурин Н.М., Левкин Н.Д., Гуменик И.Л., Борисович В.Т., Чайников В.В., Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Зелинская Е.В., Александрова Т.Н., Радченко Д.Н., Экс В.В., Усманова Т.В., Архипов А.В., Решетняк С.П. и др. Их исследования посвящены

разработке классификаций техногенных минеральных образований и техногенных месторождений, выявлению особенностей учета и оценки техногенных месторождений, исследованию техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду, обоснованию технологических решений для формирования и рекультивации техногенных месторождений, извлечения и использования ценных минеральных компонентов.

Следует отметить, что в настоящее время при обосновании конкретных технологических решений для освоения и сохранения ресурсов ТМ в масштабах угледобывающего региона недостаточно внимания уделяется оценке их воздействия на окружающую среду, что обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований в этой области и является актуальным направлением развития горной науки.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины** по пунктам 9 и 13.

**Целью работы** является научное обоснование технологических решений, обеспечивающих эффективность и безопасность освоения и консервации ресурсов техногенных месторождений угледобывающего региона на основе оценки их воздействия на окружающую среду.

**Идея работы** заключается в том, что эффективность и безопасность технологических решений по освоению и сохранению ресурсов техногенных месторождений в масштабах угледобывающего региона достигается посредством создания новых технологий отработки и консервации, а также ранжирования указанных объектов по очередности их использования на основе оценки их воздействия на окружающую среду.

Современное состояние знаний по рассматриваемой проблеме обусловили необходимость постановки и решения следующих **задач исследований**:

1 Разработка и усовершенствование математических моделей оценки предельного равновесия массива техногенного месторождения, определения зон влияния переноса пыли и газовых загрязнителей с поверхности техногенных месторождений в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с поверхности техногенных месторождений на прилегающие территории.

2 Разработка методических положений комплексного мониторинга для оценки техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду и способов снижения такого воздействия с использованием зон влияния источника загрязнения в зависимости от основных влияющих факторов.

3 Разработка алгоритма выбора наилучших доступных технологий, обеспечивающих снижение или исключение воздействий техногенных минеральных образований на окружающую среду для определенных условий конкретного объекта.

4 Разработка технологических решений по освоению и сохранению техногенных месторождений угледобывающего региона на основе оценки их воздействия на окружающую среду.

5 Обоснование применения метода нечеткой кластеризации для ранжирования техногенных месторождений в масштабах угледобывающего региона, позволяющего определить очередность освоения данных объектов.

6 Осуществление выбора технологий обработки техногенных месторождений и консервации потенциальных техногенных месторождений на основе оценки их эффективности и безопасности.

**Научная новизна:**

1 Усовершенствованы математические модели определения зон влияния деформаций техногенных месторождений, переноса пыли и газовых загрязнителей с поверхности ТМ в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с поверхности ТМ на прилегающие территории.

2 На основе результатов натурных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов определены количество зон влияния техногенных месторождений на окружающую среду и их характерные размеры.

3 Разработаны методические положения и структурно-функциональная схема комплексного мониторинга зон влияния ТМО, позволяющие выполнить оценку степени воздействия техногенных минеральных образований на окружающую среду и способов снижения этого воздействия.

4 Получен расчётный коэффициент, используемый при определении производительности и основных параметров шнекобуровой обработки техногенных месторождений, учитывающий размеры свода естественного обрушения породы над скважиной.

5 Установлены закономерности изменения напряженного состояния межскважинных целиков от их размеров, отличающиеся учетом сцепления и угла внутреннего трения пород и позволяющие обосновать параметры бурошнековой выемки с заданным диаметром скважин на различной глубине при освоении техногенных месторождений.

6 Предложен алгоритм определения направления рекультивационных работ для сформированных прошлой экономической деятельностью ТМО и ТМ в зависимости от преобладающей категории земельных участков, расположенных в зоне их влияния.

7 Обоснована необходимость реализации алгоритма нечеткой кластеризации для ранжирования техногенных месторождений по очередности освоения и сохранения их ресурсов.

8 Обоснован выбор технологических решений для освоения и сохранения ресурсов техногенных месторождений угледобывающего региона.

**Теоретическая и практическая значимость** работы определяются:

– усовершенствованными на основе уточненных закономерностей и с применением предложенного подхода по созданию цифровой модели техногенных минеральных образований с применением БПЛА математическими моделями определения зон влияния деформаций, переноса пыли и газовых загрязнителей с поверхности ТМ в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с поверхности ТМ на прилегающие

территории, используемых для оценки воздействия на окружающую среду, предельного состояния пород техногенных месторождений и для разработки технологий освоения и сохранения их ресурсов;

- предложенной структурой и описанием функционала комплексного мониторинга влияния ТМО на окружающую среду;

- разработанным алгоритмом выбора направления использования техногенных минеральных образований с учетом конкретных особенностей угледобывающего региона;

- разработанной технологией разборки конических и хребтовых техногенных минеральных образований (патент РФ на изобретение № 2773166);

- разработанной технологией консервации и изоляции промышленных отвалов (патент РФ на изобретение № 2636174), основанной на гидроструйной цементации пород;

- предложенным способом выбора направления рекультивации техногенных минеральных образований и техногенных месторождений, сформированных в результате прошлой экономической деятельности, в зависимости от преобладающей категории земельных участков, расположенных в зоне их влияния;

- ранжированием техногенных месторождений Подмосковского, Кузнецкого и Донецкого угольных бассейнов по очередности освоения и сохранения их ресурсов, произведенным на основе алгоритма их нечеткой кластеризации;

- выполненной экспертной оценкой технологий освоения и сохранения ресурсов техногенных месторождений.

**Методология и методы исследования:** комплексный системный анализ результатов натуральных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов при изучении техногенных минеральных образований в Кузнецком, Донецком и Подмосковном угольных бассейнах, представленных породными отвалами угольных шахт; современные теоретические достижения геомеханики, аэрогазодинамики и математической физики; численные решения задач теории упругости методом начальных параметров и методом конечных разностей; автоматизированные статистические методы обработки больших массивов цифровой информации; метод экспертных оценок; нечеткая кластеризация.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1 Предложенная математическая модель, базирующаяся на совместном применении метода начальных параметров и метода конечных разностей, позволяет выполнить оценку предельного равновесия массива техногенных месторождений.

2 Оценку воздействия техногенных месторождений на окружающую среду необходимо проводить с учетом количества и размеров зон влияния их деформаций, ветровой и водной эрозии, фильтрации воды, определяемых на основе результатов натуральных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов.

3 Основным параметром для определения производительности буровых выемок при разработке техногенных месторождений является суммарный объем пород из выемочной скважины и свода естественного обрушения

над ней, определяемый с использованием полученного коэффициента извлечения.

4 Выбор технологических схем и определение параметров бурошнековой выемки необходимо производить на основе оценки предельного напряженного состояния межскважинных целиков, устойчивости пород и размеров техногенных месторождений.

5 Для ранжирования техногенных месторождений по условию очередности освоения и сохранения ресурсов необходимо использование нечеткой кластеризации, определяющей степень принадлежности объекта к каждому кластеру.

6 Эффективность и безопасность отработки техногенных месторождений с помощью бурошнековой выемки по сравнению с другими технологиями достигается использованием высокопроизводительной техники относительно непрерывного действия, исключением процесса вскрытия месторождения, возможностью селективной отработки, минимизацией новых породных обнажений, отсутствием переэкскавации породы, производством работ без использования оборудования и без присутствия людей на поверхности отвала.

7 Эффективность и безопасность консервации потенциальных техногенных месторождений гидроструйной цементацией пород по сравнению с другими технологиями достигается обеспечением изоляции объекта по подошве и поверхности породобетонным экраном, что позволяет исключить воздействие на окружающую среду и сохранить ресурсы.

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректной постановкой задач исследований; обоснованным использованием методов и современных достижений геотехнологии, геомеханики, математической физики, физической химии, математической статистики и компьютерных технологий; репрезентативным объемом результатов лабораторных и вычислительных экспериментов, свидетельствующих об адекватности разработанных и усовершенствованных моделей.

**Апробация работы.** Научные положения и практические рекомендации диссертационной работы в целом и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на ежегодных научных семинарах института горного дела и строительства ТулГУ (г. Тула, 2017 – 2024 гг.), ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2018 – 2024 гг.), XVI Международной научно-практической конференции «Экономика и инжиниринг: от теории к практике» (г. Минск, 2020 г.), IX Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» (г. Екатеринбург, 2020 г.), ежегодных Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2021 – 2022 г.), XV Международной конференции "Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах" (г. Санкт-Петербург, 2023 г.), ежегодных Международных конференциях по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики "Социально-экономические и экологические проблемы

горной промышленности, строительства и энергетики" (Тула-Минск-Донецк, 2016 – 2023 гг.).

**Реализация работы.** Теоретические результаты и технические решения включены в базовые учебные курсы по проектированию современных геотехнологий для студентов, обучающихся по специальности «Горное дело», а также использованы при выполнении договорных и госбюджетных НИР в Тульском государственном университете.

**Личный вклад** заключается в обосновании идеи работы и ее реализации путем постановки цели и задач исследования; в математической обработке результатов натуральных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов; в усовершенствовании математических моделей предельного состояния пород техногенных месторождений, переноса пыли и газовых загрязнителей в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с техногенных месторождений на прилегающие территории для прогнозирования параметров зон влияния источника загрязнения; разработке новых технологий освоения и сохранения техногенных месторождений; в разработке алгоритмов ранжирования техногенных месторождений, оценки и выбора технологий.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликованы 35 научных работ, в том числе: 22 в изданиях, включенных в Международные реферативные базы данных Web of Science, Scopus, Перечень ВАК Минобрнауки РФ; 3 в изданиях, включенных в базу данных публикаций Russian Science Citation Index, 4 в научных сборниках и материалах конференций со всероссийским и международным участием и др.; получены два патента РФ на изобретение и 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, изложенных на 304 страницах машинописного текста, содержащего 20 таблиц, 159 рисунков, список литературы из 220 наименований и 6 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В первой главе произведен анализ современного состояние проблемы отходов горного производства, техногенного воздействия минеральных образований на компоненты окружающей среды, рассмотрены принципы типизации техногенных массивов и перспективы использования отвалов угольных шахт в качестве техногенных месторождений.*

Источником наибольшей массы отходов в 2016 – 2023 годах на территории Российской Федерации стала добывающая промышленность. Динамика данного показателя по доле отрасли добычи полезных ископаемых показывает устойчивый рост.

Масса отходов по отрасли добычи полезных ископаемых складывается из отходов добычи угля, сырой нефти и природного газа, металлических руд,

прочих полезных ископаемых и предоставления услуг в области добычи полезных ископаемых.

Из массы отходов, образованной в процессе добычи полезных ископаемых, самая большая доля приходится на отходы, образованные при добыче угля, которые накапливались на дневной поверхности долгие годы, и представляет собой техногенные минеральные образования, которые сейчас, при наличии технологий и экономической целесообразности извлечения полезных компонентов, можно рассматривать как техногенные месторождения. Все эти объекты, сформированные в результате прошлой экономической деятельности, оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

На сегодняшний день предложено большое количество классификаций воздействий: техногенные воздействия, воздействия по видам деятельности или воздействия определенных объектов, воздействия на геологическую, природную или окружающую среду.

При рассмотрении воздействия ТМО на основные компоненты геологической среды выделению подлежат почвы и искусственные грунты, горные породы, рельеф территории, подземные воды и геодинамические процессы. Для окружающей среды необходимо дополнительно рассматривать растительность и поверхностные воды.

Для оценки техногенного воздействия минеральных образований, представленных породными отвалами угольных шахт, на компоненты окружающей среды целесообразно рассматривать факторы взаимодействия данных образований с окружающей средой:

- деформации техногенных минеральных образований;
- фильтрация воды сквозь тело ТМО;
- водная эрозия;
- ветровая эрозия.

Влияние этих факторов сопровождается техногенные минеральные образования все время их существования. Все эти факторы способствуют переносу вещества техногенных минеральных образований в окружающую среду.

Деление техногенных месторождений на классы чаще всего производится по признаку наличия полезного компонента в техногенном минеральном сырье, на подклассы – по направлению использования техногенных запасов. Выделение видов ТМ осуществляется по признакам, характеризующим техногенное месторождение с точки зрения возможной технологии его комплексного освоения. Известные классификации основываются на иерархическом методе построения, который обладает рядом недостатков: негибкая структура, фиксированный порядок ступеней распределения, нет возможности для введения новых объектов и признаков.

При определении очередности освоения техногенных месторождений, образованных в результате добычи угля, их можно классифицировать по объему горной массы, площади, занимаемой ТМ, площади поверхности ТМ, площади зоны влияния ТМ, площадям земельных участков разных категорий, входящих в зону влияния ТМ, и др., применяя нечеткую кластеризацию, позволяющую

производить более «естественное» определение принадлежности объектов к кластерам с учетом указанных параметров.

Состав пород техногенных минеральных образований, сформированных при подземной разработке угольных месторождений, показывает высокий потенциал их использования как техногенных месторождений. Подтверждена возможность отработки таких техногенных месторождений для получения строительных материалов, удобрений, сырья для металлургии, энергетического сырья (рисунок 1).

Таким образом, техногенные минеральные образования, сформированные в результате добычи угля, являются потенциальными техногенными месторождениями, освоение и сохранение которых позволит не только получить дополнительные ресурсы, но и существенно снизить или исключить техногенную нагрузку на окружающую среду. Такие потенциальные техногенные месторождения сосредоточены в угледобывающих регионах, и технологические решения для их освоения и сохранения должны быть не только эффективными и безопасными, но и универсальными для применения на всех подобных рассматриваемых объектах.

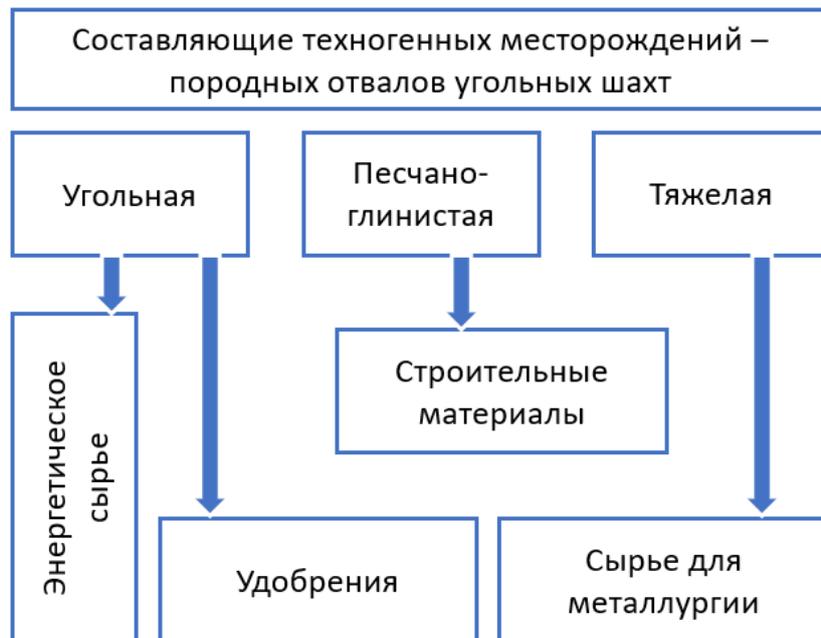


Рисунок 1 – Направления использования пород техногенных месторождений по составляющим

*Во второй главе* приведены аналитические исследования свойств породной массы, деформаций техногенных минеральных образований, загрязнений прилегающих к ним территорий на основе натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов, а также предложен подход для определения геометрических параметров техногенных минеральных образований.

Обобщение результатов натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов в рамках исследования физико-механических, физико-химических и водно-физических свойств породной массы ТМО и загрязнения прилегающих к ТМО территорий позволило уточнить закономерности переноса пыли и газовых

загрязнителей с техногенных месторождений в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с ТМО на прилегающие территории.

Установлено, что одним из важнейших факторов, влияющим на возникновение и развитие деформаций поверхности техногенных минеральных образований и на интенсивность их воздействия на окружающую среду, является форма ТМО. Предложен подход по созданию цифровой модели ТМО с использованием БПЛА (рисунок 2), который позволяет получать информацию для оценки негативного воздействия ТМО на окружающую среду, выбора способов устранения или снижения такого воздействия, оценки предельного состояния пород ТМО, а также для разработки технологий освоения и сохранения техногенных месторождений.

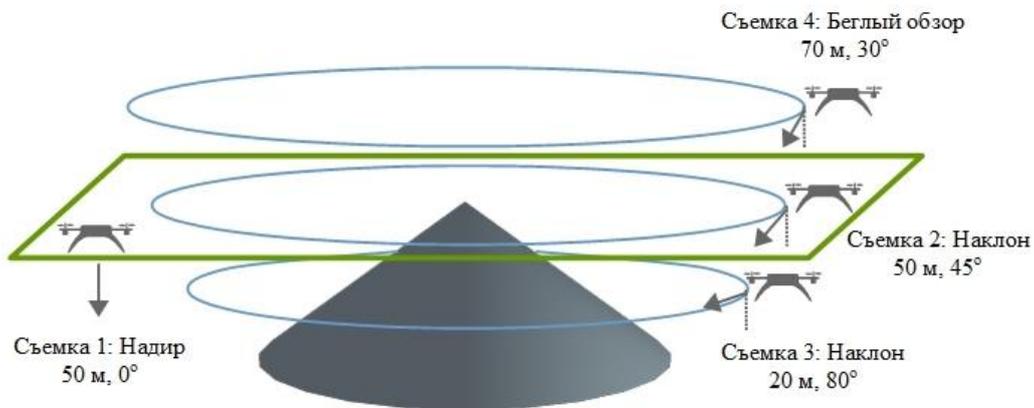


Рисунок 2 – Этапы съемки ТМО

Цифровая модель (рисунок 3) используется для построения карт, разрезов и профилей поверхности, для получения информации обо всех геометрических параметрах ТМО – занимаемой площади, площади поверхности, объеме и т. д.

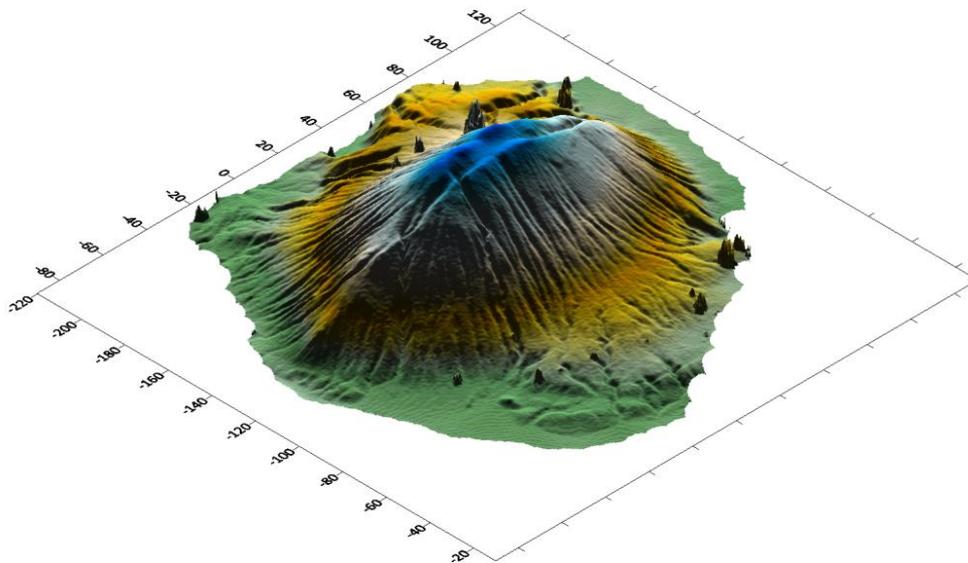


Рисунок 3 – Цифровая модель ТМО (породный отвал шахты № 13 «Мостовская»), построенная по данным аэрофотосъемки БПЛА

*В третьей главе произведено моделирование воздействия потенциальных техногенных месторождений на окружающую среду.*

Для оценки предельного состояния пород потенциальных ТМ предложено использовать математическую модель, основанную на совместном применении уравнений методов начальных параметров и конечных разностей.

Определение функций напряжений для оценки предельного состояния пород потенциальных ТМ предлагается производить на основе уравнений в полярной системе координат. Такой подход дает возможность наиболее полно учитывать геометрические характеристики потенциальных ТМ. Для получения функции напряжений на границах исследуемой области массива пород необходимо произвести расчет рам-аналогов контура области. Точки рамной аналогии лежат на прямолинейных и криволинейном элементах рамной аналогии. Для расчета рам-аналогов используем модель, базирующуюся на уравнениях метода начальных параметров, позволяющую наиболее полно учитывать граничные условия.

Общую расчётную модель рамной аналогии можно представить системой матричных уравнений:

– условия равновесия и совместности перемещений всех элементов рамной аналогии:

$$A_{1,1}^i \bar{p}_0^i + A_{1,2}^i \bar{s}^i + A_{1,3}^i \bar{t}^i + A_{1,4}^i \bar{p}_0^{i+1} + A_{1,5}^i \bar{\delta}^i = \bar{b}_1^i, \quad i = \overline{1, N}; \quad (1)$$

– условия взаимодействия элементов рамной аналогии с породами:

$$A_{2,1}^i \bar{p}_0^i + A_{2,2}^i \bar{s}^i + A_{2,3}^i \bar{t}^i = \bar{b}_2^i, \quad i = \overline{1, N}; \quad (2)$$

$$A_{3,1}^i \bar{p}_0^i + A_{3,2}^i \bar{s}^i + A_{3,3}^i \bar{t}^i = \bar{b}_3^i, \quad i = \overline{1, N}; \quad (3)$$

– условия на “опорах” и в соединениях элементов:

$$G_1 \bar{p}_0^1 + G_2 \bar{p}^{N+1} = \bar{q}; \quad (4)$$

$$G_3 \bar{p}_0^{i+1} + G_4 \bar{\delta}^i = \bar{b}_4^i, \quad i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Для определения функций напряжений во всех точках сетки необходимо решить систему линейных уравнений. Чтобы составить матрицу коэффициентов при неизвестных целесообразно пронумеровать точки сетки, как показано на рисунке 4.

Для определения функций напряжений во внутренних точках бигармонический оператор будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda^4 \nabla^2 \nabla^2 \varphi_i = & v_1 \varphi_i + v_2 \varphi_{i-(nk+3)} + v_3 \varphi_{i+(nk+3)} + v_4 \varphi_{i+1} + v_4 \varphi_{i-1} + \\ & + v_5 \varphi_{i-(nk+3)+1} + v_5 \varphi_{i-(nk+3)-1} + v_6 \varphi_{i+(nk+3)-1} + v_6 \varphi_{i+(nk+3)+1} + \\ & + v_7 \varphi_{i-2(nk+3)} + v_8 \varphi_{i+2(nk+3)} + v_9 \varphi_{i+2} + v_9 \varphi_{i-2} \end{aligned} \quad (6)$$

где 
$$v1_i = \frac{(1 - \chi_i)(1 + \chi_{i-(nk+3)}) + (1 + \chi_i)(1 - \chi_{i+(nk+3)}) + 2\alpha_i^2 - 4(1 + \alpha_i)^2}{\lambda^4};$$

$$v2_i = \frac{2(1 - \chi_i)(2 + \alpha_i + \alpha_{i-(nk+3)})}{\lambda^4}; v3_i = \frac{2(1 + \chi_i)(2 + \alpha_i + \alpha_{i+(nk+3)})}{\lambda^4};$$

$$v4_i = \frac{4\alpha_i(1 + \alpha_i)}{\lambda^4}; v5_i = \frac{(1 - \chi_i)(\alpha_{i-(nk+3)} + \alpha_i)}{\lambda^4}; v6_i = \frac{(1 + \chi_i)(\alpha_{i+(nk+3)} + \alpha_i)}{\lambda^4};$$

$$v7_i = \frac{(1 - \chi_i)(1 - \chi_{i-(nk+3)})}{\lambda^4}; v8_i = \frac{(1 + \chi_i)(1 + \chi_{i+(nk+3)})}{\lambda^4}; v9_i = \frac{\alpha_i^2}{\lambda^4}.$$

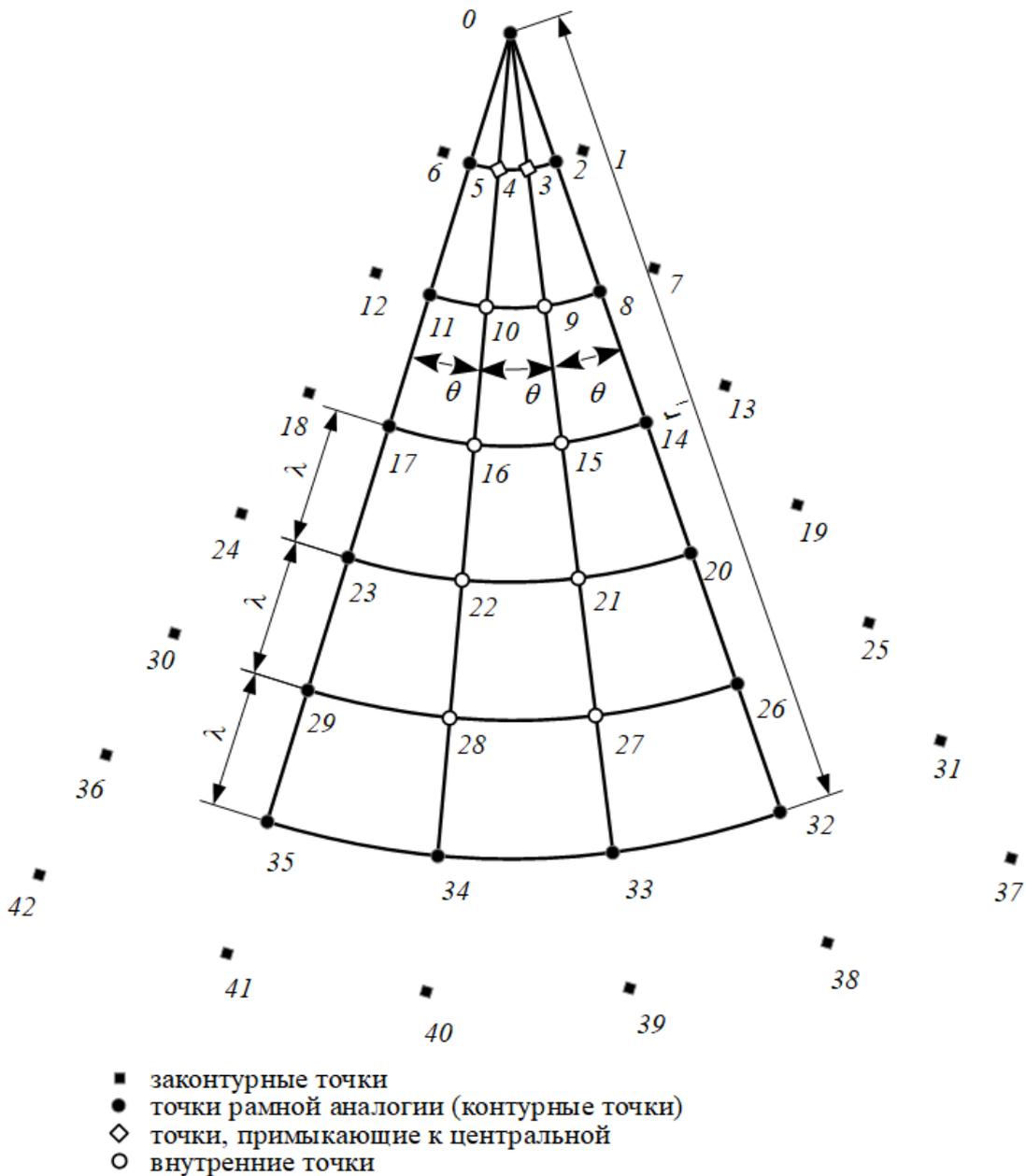


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения функций напряжений в массиве пород потенциальных ТМ

Для определения функций напряжений во внутренних точках, примыкающих к границам, функций напряжений на границах недостаточно, необходимо отыскать решения для законтурных точек. Такие решения отличаются для точек за прямолинейными контурами и точек за криволинейным контуром.

Так для точки 19 (рисунок 4) решение выглядит следующим образом:

$$\Phi_{19} = \Phi_{21} + 2r_{20}\theta|N|_{20}, \quad (7)$$

где  $N$  – продольная сила в необходимой точке рамной аналогии.

Для точки 39 (рисунок 4) решение имеет следующий вид:

$$\Phi_{39} = \Phi_{27} + 2\lambda|N|_{33}. \quad (8)$$

Выражения (6), (7) и (8) позволяют составить систему линейных уравнений, решение которой позволит определить функции напряжений в узлах полярной сетки, аппроксимирующей массив пород потенциальных ТМ.

По полученной матрице функций напряжений производится расчет фиктивных напряжений (без учета собственного веса пород исследуемой области массива).

Составляющая фиктивных нормальных напряжений в радиальном направлении для нумерации точек, принятой на рисунке 6:

$$\sigma'_r = \frac{\Phi_{i+(nk+3)} - \Phi_{i-(nk+3)}}{2r_i\lambda} + \frac{\Phi_{i+1} - 2\Phi_i + \Phi_{i-1}}{r_i^2\theta^2}.$$

Составляющая фиктивных нормальных напряжений в тангенциальном направлении:

$$\sigma'_\theta = \frac{\Phi_{i-(nk+3)} - 2\Phi_i + \Phi_{i+(nk+3)}}{\lambda^2}.$$

Касательное напряжение:

$$\tau'_{r\theta} = \frac{\Phi_{i+(nk+3)-1} - \Phi_{i+(nk+3)+1} - \Phi_{i-(nk+3)-1} + \Phi_{i-(nk+3)+1}}{4\lambda r_i\theta} + \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}}{2r_i^2\theta}.$$

Чтобы при анализе предельного равновесия пород исследуемого потенциального ТМ учесть действие собственного веса пород, действительные нормальные напряжения  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  выражаются суммой напряжений  $\sigma'_r$ ,  $\sigma'_\theta$  и гидростатического давления, определяемого потенциалом  $U$ ; действительные касательные напряжения равны  $\tau'_{xy}$ .

$$\sigma_r = \sigma'_r + U; \quad \sigma_\theta = \sigma'_\theta + U; \quad \tau_{r\theta} = \tau'_{r\theta}.$$

Для распределенной нагрузки потенциал может быть записан так:

$$U = -\gamma r.$$

Этот потенциал соответствует гидростатическому давлению, которое легко реализовать, погрузив тело в перевернутом виде (по отрицательному направлению  $r$ ) в жидкость с объемной массой  $\gamma$ .

Для оценки предельного состояния пород в каждом узле конечноразностной сетки проверяется выполнение условия прочности Кулона-Мора, что

позволяет определить узлы сетки и, соответственно, области исследуемого массива пород, в которых данное условие не выполняется.

$$\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}^2 = \frac{\sin^2 \rho}{4}(\sigma_r + \sigma_\theta + 2H)^2,$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения пород;  $H = k \cdot ctg\rho$  – временное сопротивление всестороннему равномерному растяжению;  $k$  – коэффициент сцепления пород.

Разработан пакет программных модулей, позволяющий на основе совместного использования метода конечных разностей и метода начальных параметров оценивать предельное состояние пород хребтовых техногенных месторождений.

Для применения пакета программных модулей на примере исследования предельных состояний пород потенциального ТМ, образованного в результате работы шахты № 13 «Мостовская», построена цифровая модель ТМ, топографический план ТМ и разрез.

По геометрии разреза определены параметры рамной аналогии и расчетной схемы в целом (длины, радиусы и углы сопряжения элементов, центральный угол криволинейного элемента, количество участков прямолинейных и криволинейного элемента и другие).

Результаты оценки предельных состояний исследуемой области массива пород потенциального ТМ приведены на рисунке 5. Светлыми точками отмечены те узлы сетки расчетной схемы, в которых условие прочности Кулона-Мора не выполняется.

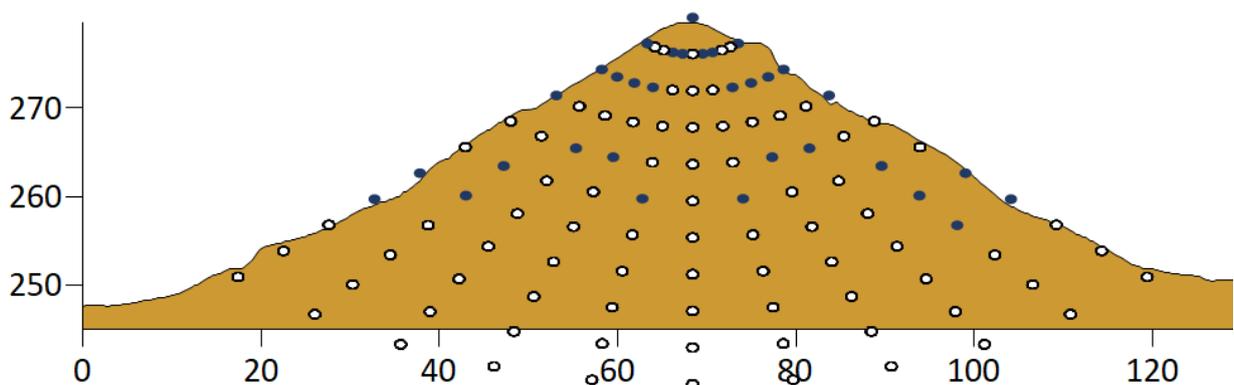


Рисунок 5 – Оценка предельных состояний массива пород потенциального ТМ (шахта № 13 «Мостовская»)

Из рисунка 5 видно, что неустойчивые области находятся в районе хребта, по откосам и в основании ТМ и есть большая вероятность деформирования с изменением формы вершины, выполаживанием откосов и увеличением площади поверхности ТМ.

В результате анализа оценки предельных состояний массива пород потенциального ТМ (шахта № 13 «Мостовская») можно спрогнозировать увеличение площади поверхности ТМ на 6-8 %. Это позволяет сделать вывод о значительном

увеличении негативного воздействия ТМ на окружающие территории за счет воздействия водной и ветровой эрозии.

Решено уравнение конвективно-турбулентной диффузии пыли в приземном слое атмосферы зоны влияния ТМ с учетом ее седиментации для условий:

– начальное условие:  $c_n(x, 0) = 0$ ;

– граничные условия:  $c_n(0, t) = c_H = \text{const}$ ,  $\lim_{x \rightarrow \infty} c_n \neq \infty$ .

$$c_n(x, t) = 0,5c_H \exp\left(\frac{0,5v}{D_n} x\right) \left\{ \exp\left[-0,5 \left(\sqrt{\frac{v^2}{D_n^2} + \frac{4kw_g}{D_n}}\right) x\right] \times \right. \\ \times \text{erfc}\left[\frac{0,5x}{\sqrt{D_n t}} - \sqrt{0,25 \left(\frac{v^2}{D_n} + 4kw_g\right) t}\right] + \exp\left[0,5 \left(\sqrt{\frac{v^2}{D_n^2} + \frac{4kw_g}{D_n}}\right) x\right] \times \\ \left. \times \text{erfc}\left[\frac{0,5x}{\sqrt{D_n t}} + \sqrt{0,25 \left(\frac{v^2}{D_n} + 4kw_g\right) t}\right] \right\}, \quad (9)$$

где  $c_n$  – концентрация пыли в воздушном потоке;  $v$  – средняя скорость воздуха с подветренной стороны ТМ;  $D_n$  – коэффициент турбулентной диффузии пыли в приземном слое атмосферы;  $k$  – коэффициент седиментации;  $w_g$  – скорость витания пыли в воздухе.

В процессе моделирования установлено, что пыль малых фракций в зависимости от длительности действия ветра и его скорости может распространяться на значительные расстояния от пылящего объекта. Результаты натурных наблюдений подтверждают этот факт.

Решено уравнение конвективно-турбулентного переноса газовых загрязнителей в приземном слое атмосферы зоны влияния ТМ для условий:

– начальное условие:  $c_{2.n}(x, 0) = 0$ ;

– граничные условия:  $c_{2.n}(0, t) = c_1 = \text{const}$ ,  $\lim_{x \rightarrow \infty} c_{2.n} \neq \infty$ .

$$c_{2.n}(x, t) = 0,5c_1 \exp\left(\frac{0,5v}{D_{2.n}} x\right) \left\{ \exp\left[-0,5 \left(\frac{v}{D_{2.n}}\right)^2 x\right] \text{erfc}\left[0,5 \left(\frac{x}{\sqrt{D_{2.n} t}} - v \sqrt{\frac{t}{D_{2.n}}}\right)\right] + \right. \\ \left. + \exp\left[0,5 \left(\frac{v}{D_{2.n}}\right)^2 x\right] \text{erfc}\left[0,5 \left(\frac{x}{\sqrt{D_{2.n} t}} + v \sqrt{\frac{t}{D_{2.n}}}\right)\right] \right\}, \quad (10)$$

где  $c_{2.n}$  – концентрация газового загрязнителя в воздушном потоке;  $v$  – средняя скорость воздуха с подветренной стороны ТМ;  $D_{2.n}$  – коэффициент турбулентной диффузии газового загрязнителя в приземном слое атмосферы.

В процессе переноса газового загрязнителя, как показывает анализ результатов вычислительного эксперимента, его концентрация в течение периода

действия ветра меняется незначительно. Из воздушного потока выведение газового загрязнителя происходит в основном за счет сорбции жидкими и твердыми частицами.

Для оценки влияния потенциальных ТМ на состояние окружающей среды необходимо определить площадь бассейна стока на основе цифровой модели местности и основные пути поступления на прилегающие к ТМ территории поллютантов. Учитывая то, что насыпные ТМ возвышаются над окружающей территорией, определение бассейна стока сводится к определению площади поверхности ТМ. Методика оценки стоков с потенциальных техногенных месторождений показана на рисунке 6.



Рисунок 6 – Методика оценки стоков с потенциальных техногенных месторождений

Таким образом, годовые расходы дождевых и талых стоков с техногенных минеральных образований определяют размеры и форму зоны их негативного влияния на окружающие территории.

С учетом кинетики сорбции загрязнителя твердой фазой подстилающих пород и почв вертикальная миграция загрязнителя в почву и далее в подстилающие породы удовлетворительно описывается одномерным уравнением конвективной диффузии. В этом случае рационально подвергать рассмотрению полубесконечное пространство. В соответствии с расчетной схемой миграции токсичных компонентов в подстилающие породы и почву с потенциальных ТМ решено уравнение миграции загрязнителя:

$$\begin{aligned}
c(z, t) = c_0 \exp(-Kt) + 0,5 \exp(0,5\alpha z) & \left\langle c_b \left[ \exp(-\sqrt{AB}) \operatorname{erfc}\left(0,5\sqrt{A/t} - \sqrt{Bt}\right) + \right. \right. \\
& + \left. \exp(\sqrt{AB}) \operatorname{erfc}\left(0,5\sqrt{A/t} + \sqrt{Bt}\right) \right] - c_0 \exp(-At) \left\{ \exp\left[-\sqrt{A(B-K)}\right] \times \right. \\
& \times \operatorname{erfc}\left[0,5\sqrt{A/t} - \sqrt{(B-K)t}\right] + \exp\left[\sqrt{A(B-K)}\right] \times \\
& \left. \left. \times \operatorname{erfc}\left[0,5\sqrt{A/t} + \sqrt{(B-K)t}\right] \right\} \right\rangle, \quad (11)
\end{aligned}$$

где  $c(z, t)$  – концентрация загрязнителя в горных породах;  $v$  – средняя скорость фильтрации почвенного раствора;  $D_s$  – коэффициент диффузии;  $K$  – константа скорости сорбции загрязнителя горными породами;  $\alpha = v / D_s$ ;  $\beta = (s + K) / D_s$ ;  $s$  – комплексный параметр;  $A = z^2 / D_s$ ;  $B = 0,25 D_s (v^2 / D_s^2 + 4K / D_s)$ .

Начальное условие:  $c(z, 0) = c_0 = \text{const}$ .

Граничные условия:  $c(0, t) = c_b = \text{const}$ ,  $\lim_{z \rightarrow \infty} c \neq \infty$ .

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что миграция токсичных компонентов жидких стоков с поверхности техногенных минеральных образований приводит к интенсивному загрязнению почвы и подстилающих пород.

Для потенциальных ТМ характерно образование жидкой фазы, появлению которой предшествует вода, накапливающаяся в результате выпадения атмосферных осадков. Вода, просачиваясь сквозь породную массу, уносит с собой растворимые вещества, образуя фильтрат. Решено уравнение вертикальной миграции фильтрата потенциальных ТМ в водоносные горизонты для условий:

– начальные условия:  $C(z, 0) = C_H = \text{const}$ ;

– граничные условия:  $C(0, t) = C_0 = \text{const}$ ;  $\lim_{z \rightarrow \infty} C(z, t) \neq \infty$ .

$$\begin{aligned}
C(z, t) = C_H \cdot \exp(-kt) + (C_H + C_0) \cdot \exp\left(\frac{V}{2D_9} z\right) \times \\
\times \exp\left(-\left(k + \frac{V^2}{4D_9}\right)t\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_9 t}}\right) + \\
+ \exp\left(\frac{V}{2D_9} z\right) \cdot \int_0^t \left[ C_H \cdot \frac{V^2}{4D_9} \cdot \exp(-k\tau) + C_0 \cdot \left(k + \frac{V^2}{4D_9}\right) \cdot \exp(-k\tau) \right] \times \\
\times \exp\left(-\frac{V^2}{4D_9} \tau\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_9 \cdot \tau}}\right) d\tau, \quad (12)
\end{aligned}$$

где  $C(z, t)$  – концентрация мигрирующего компонента в фильтрате;  $V$  – составляющая вектора скорости фильтрации по оси  $z$ ;  $D_9$  – эффективный (эквивалентный) коэффициент диффузии;  $k$  – константа скорости сорбции.

В результате вычислительного эксперимента установлено, что токсичная часть компонентов фильтрата загрязняет грунтовые воды.

*В четвертой главе предложена концепция учета техногенных минеральных образований, на основе проведенных вычислительных экспериментов смоделированы количество и параметры зон влияния техногенных месторождений на окружающую среду и произведен дистанционный мониторинг для оценки воздействия техногенных месторождений на окружающую среду по угледобывающим регионам.*

Важность учета минеральных техногенных образований обусловлена как негативным влиянием ТМО на окружающую среду, так и потенциальными возможностями ТМО в плане извлечения из них полезных компонентов. Первая причина определяется воздействием ТМО на воздушный и водный бассейны, сельскохозяйственные угодья, особенно на состояние почвенного покрова. Учёт и фиксация характеристик ТМО позволяет производить оценку их негативного влияния на окружающую среду, осуществлять выбор способов и методов их рекультивации, консервации или разборки (отработки).

Для определения размеров зон влияния ТМ на окружающую среду (рисунок 7) были использованы математические модели: оценки предельного состояния пород ТМ; переноса пыли и газовых загрязнителей в приземном слое атмосферы; миграции токсичных компонентов в почву; инфильтрации стоков с ТМ на прилегающие территории.

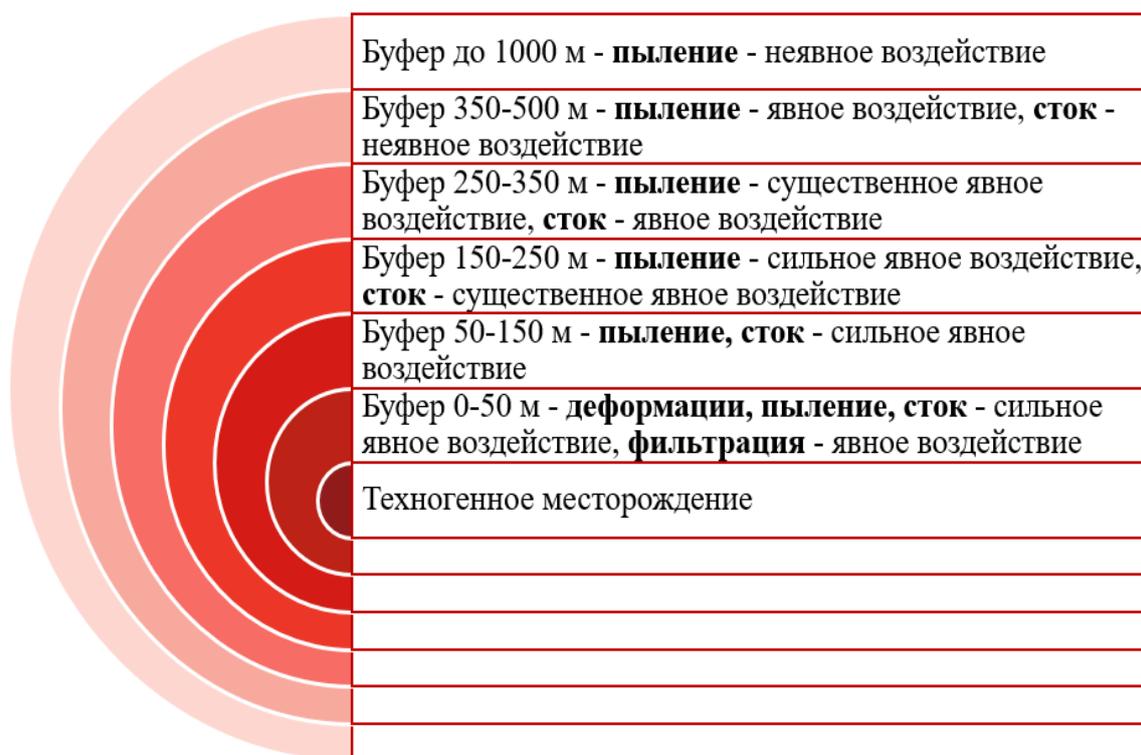


Рисунок 7 – Усредненное зонирование негативного воздействия ТМ

Комплексный мониторинг воздействия техногенных месторождений на окружающую среду включает в себя мониторинг источника загрязнения, мониторинг факторов воздействия и мониторинг окружающей среды (рисунок 8).

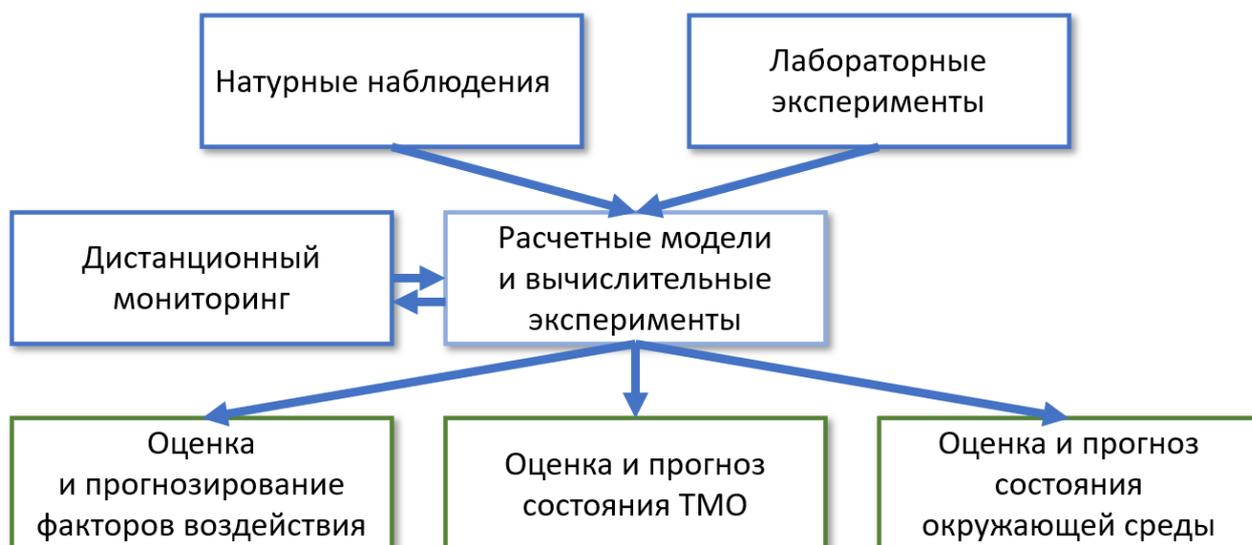


Рисунок 8 – Структура комплексного мониторинга ТМО

Для реализации дистанционного мониторинга техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду была создана программа «ГеоТМО» (рисунок 9).



Рисунок 9 – Последовательность действий программы «ГеоТМО»

Программа позволяет определять параметры буферных зон влияния техногенных минеральных образований и рассчитывать площади частей земельных участков, принадлежащих буферным зонам вокруг исследуемых образований. Результатом работы программы является реестр техногенных минеральных образований (в данном случае – техногенных месторождений), который наполняется общей информацией – о наименованиях региона и района расположения

ТМ, информацией о ТМ и информацией о частях земельных участков, находящихся в зоне влияния ТМ.

В процессе дистанционного мониторинга весьма сложными реализованными задачами являются определение пересечений полигонов земельных участков и зон влияния техногенных месторождений и вычисление площадей частей земельных участков в каждой зоне влияния (рисунок 10).

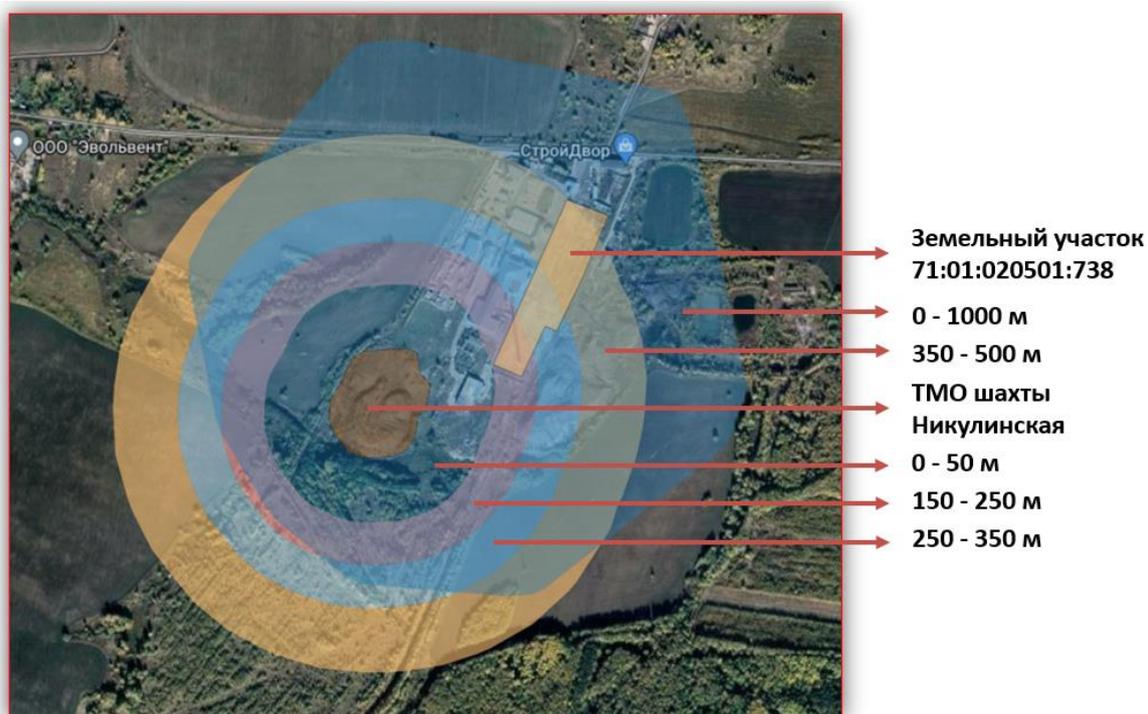


Рисунок 10 – Пересечение земельного участка с буферными зонами ТМО

На основании проведенного дистанционного мониторинга Тульской, Кемеровской и Ростовской областей были получены данные о составе земель, входящих в зоны влияния техногенных месторождений (рисунки 11 – 13).

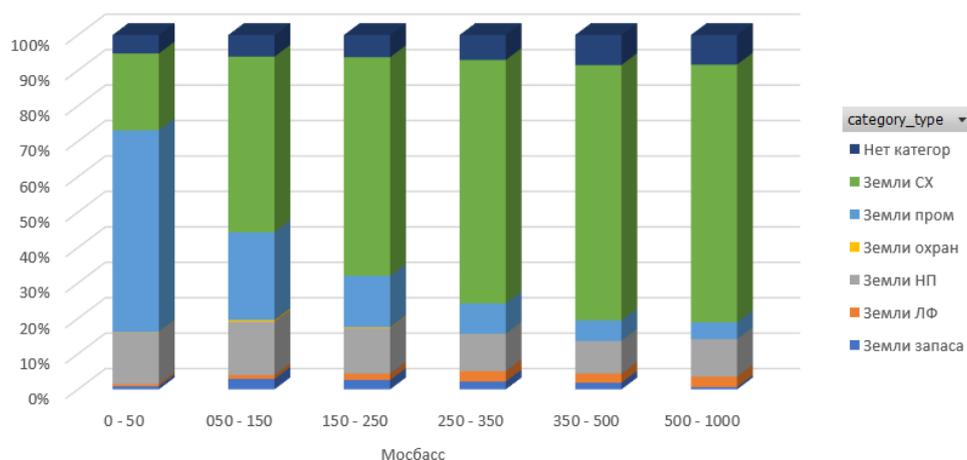


Рисунок 11 – Диаграмма распределения земель различных категорий по зонам влияния ТМ (Тульская область)

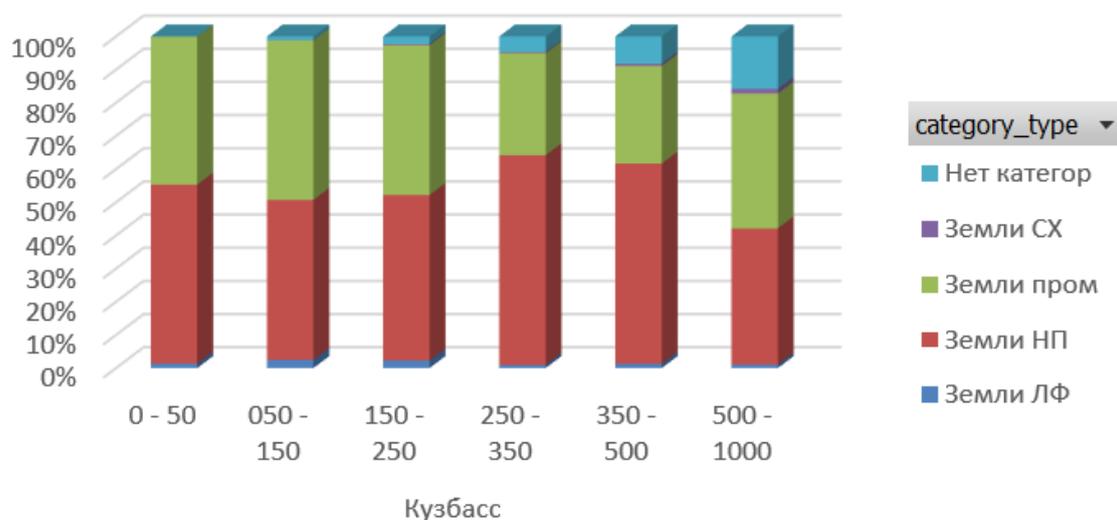


Рисунок 12 – Диаграмма распределения земель различных категорий по зонам влияния ТМ (Кемеровская область)

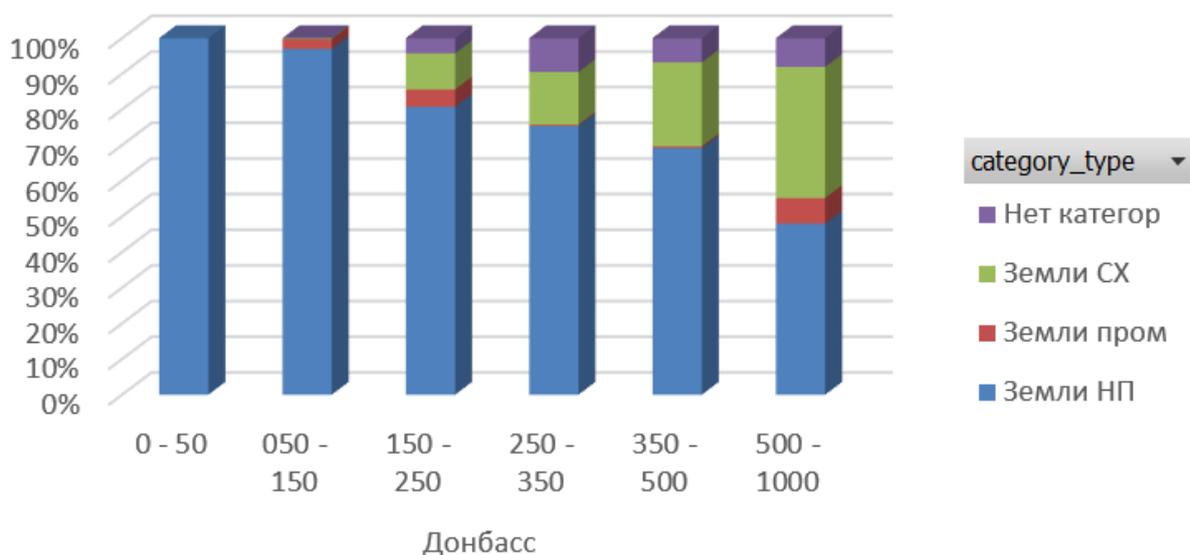


Рисунок 13 – Диаграмма распределения земель различных категорий по зонам влияния ТМ (Ростовская область)

Дистанционный мониторинг позволил практически полностью охватить ТМ, образованные в результате добычи угля, расположенные на территории Тульской области. Исследование ТМ в Кемеровской и Ростовской областях ограничено более скромным количеством ТМ, что, однако, позволяет произвести предварительную оценку воздействия ТМ на окружающую среду в этих областях.

*В пятой главе представлен анализ наилучших доступных технологий для снижения или исключения техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду, разработаны технологические решения для освоения и сохранения ресурсов техногенных месторождений, обоснован выбор направления использования техногенных месторождений в масштабах угледобывающего региона.*

Технологии снижения или исключения негативного воздействия ТМ на окружающую среду можно разделить на превентивные, консервативные и активные (рисунок 14).

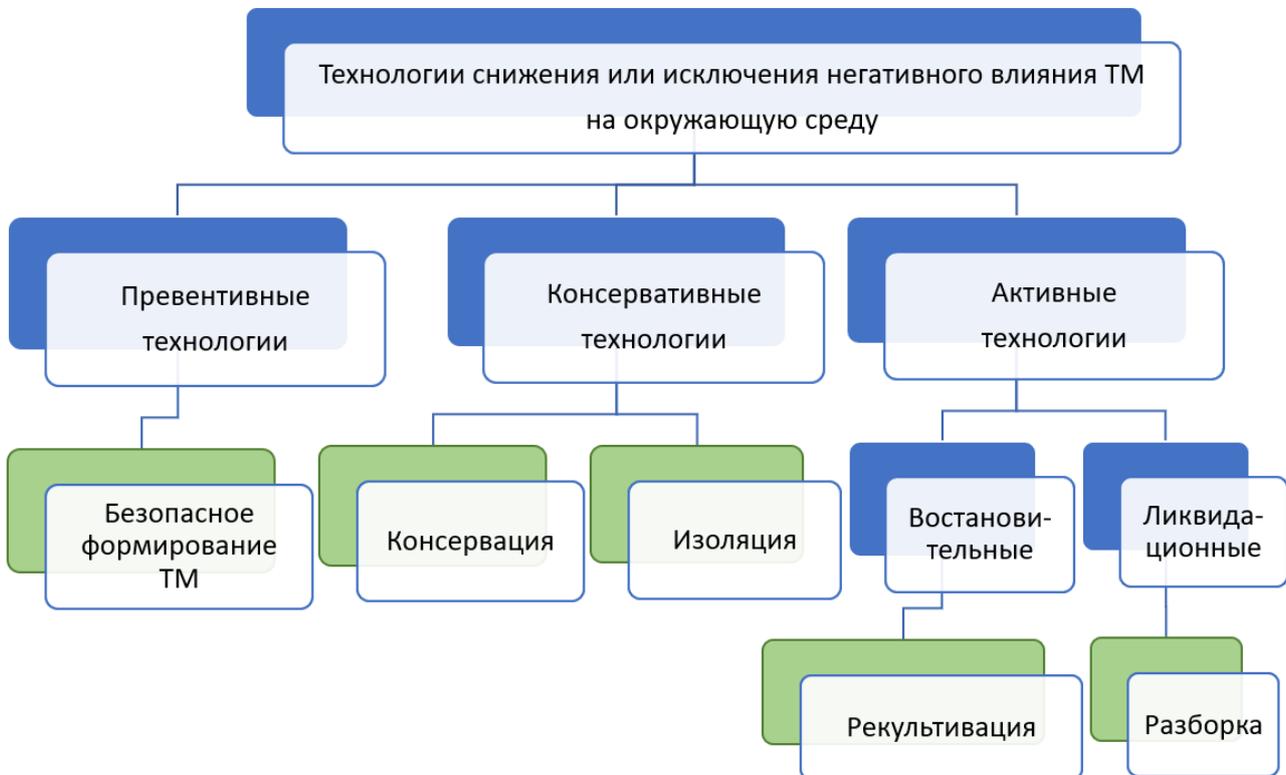


Рисунок 14 – Группы технологий для снижения или исключения негативного влияния ТМ на окружающую среду

С целью определения наилучших доступных технологий (далее – НДТ) для снижения или исключения негативного воздействия насыпных ТМ на окружающую среду были проанализированы данные, представленные в информационно-технических справочниках наилучших доступных технологий – ИТС 16-2016, ИТС 17-2016, ИТС 23-2017, ИТС 25-2017, ИТС 37-2017, ИТС 49-2017, ИТС 53-2022.

По возможности применения НДТ к насыпным техногенным месторождениям на любой стадии их существования (формирование, эксплуатация, закрытие) были отобраны более 50 НДТ. Произведен анализ уникальности технологий и обобщены совпадающие НДТ с присвоением нового обозначения.

Анализ НДТ позволил выявить недостающие технологии для снижения или исключения негативного воздействия ТМО на окружающую среду – безопасные и эффективные технологии, необходимые для полной разборки и консервации техногенных минеральных образований, в том числе и техногенных месторождений.

**Технология отработки техногенного месторождения бурошнековой установкой с использованием конвейерного транспорта** показана на рисунке 15.

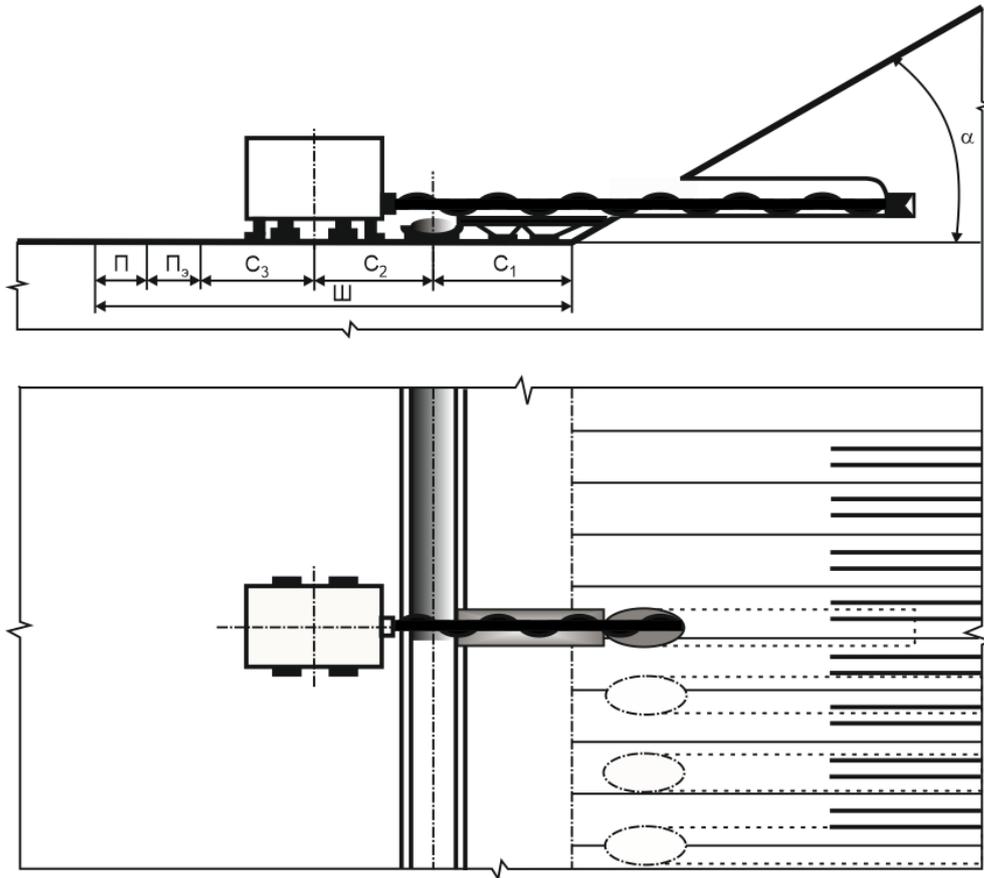


Рисунок 15 – Технология обработки техногенного месторождения бурошнековой установкой с использованием конвейерного транспорта

Технология обработки техногенных месторождений в виде конических и хребтовых отвалов заключается в следующем. На рабочей площадке у подножия откоса техногенного минерального образования размещается бурошнековая установка (шнекобуровая машина). Разрушение и выдача пород техногенного месторождения осуществляется на уровне стояния бурошнековой установки путем вращения и подачи бурового шнекового става горизонтально или под наклоном. После забуривания головной секции шнека буровой став наращивается присоединением очередной секции, и бурение продолжается до достижения свободной поверхности с другой стороны техногенного месторождения или предельных возможностей бурошнековой машины (85 – 150 м). Извлеченная порода попадает на выдвижной приемный лоток и перегружается на ленточный конвейер, установленный на рабочей площадке у подножия откоса техногенного месторождения, и транспортируется на сортировочную площадку. Между параллельно пробуренными горизонтальными или наклонными скважинами предусматривается оставление целиков. Под действием горного давления межскважинные целики разрушаются, а вышележащие породы плавно опускаются, заполняя выработанное пространство. Бурение продолжается, пока высота техногенного месторождения не понизится до проектного минимума, обусловленного возможностями использования бурошнековой установки или безопасного для работы техники и людей на поверхности техногенного месторождения.

Дальнейшая обработка техногенного месторождения может производиться с помощью выемочно-погрузочной или выемочно-транспортирующей техники (экскаватора, погрузчика, скрепера, бульдозера).

Ширина рабочей площадки для обработки техногенного месторождения бурошнековой установкой с использованием конвейерного транспорта рассчитывается по следующей формуле:

$$Ш = C_1 + C_2 + C_3 + П_э + П, \quad (13)$$

где  $Ш$  – ширина рабочей площадки, м;  $C_1$  – расстояние от оси конвейера до нижней бровки откоса техногенного месторождения –  $0,7 - 0,9H_{от}$  ( $H_{от}$  – высота отвала), м;  $C_2$  – расстояние от оси конвейера до оси хода шнекобуровой машины – 4, м;  $C_3$  – расстояние от оси хода шнекобуровой машины до полосы электроснабжения – 3, м;  $П_э$  – ширина полосы для размещения устройств электроснабжения – 6, м;  $П$  – ширина полосы для размещения дополнительного оборудования – 6, м.

Сменная производительность бурошнековой выемки рассчитывается по формуле:

$$Q_{см} = \frac{60T \frac{\pi d_{ск}^2}{4} k_{prox} k_{бс} \gamma_n \eta}{\frac{L_{б}}{v_{бур}} + \frac{L_{б}}{v_{изв}} + \left( \frac{L_{б}}{l_c} - 1 \right) (t_n + t_p) + t_{неп}}, \text{ т/смену}, \quad (14)$$

где  $T$  – время рабочей смены, ч;  $L_{б}$  – глубина бурения, м;  $d_{ск}$  – диаметр скважины, м;  $k_{бс}$  – число буровых ставов машины;  $\gamma_n$  – средневзвешенная плотность пород, т/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент использования машины в течение смены;  $v_{бур}$  – средняя скорость бурения, м/мин;  $v_{изв}$  – средняя скорость извлечения буровых ставов из скважины, м/мин;  $l_c$  – длина секции шнека, м.

В связи с тем, что предлагаемая технология обработки позволяет извлекать кроме породы скважины еще и породу, обрушающуюся на шнек, для расчёта производительности бурошнековой выемки необходимо ввести коэффициент извлечения  $k_{prox}$ , учитывающий размеры свода естественного обрушения над скважиной.

Ширина свода естественного обрушения рассчитывается по формуле:

$$B = d_{ск} \left[ 1 + tg \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (15)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения породы, град.

Высота свода обрушения рассчитывается по формуле:

$$h_{св} = \frac{B}{2f_{кр}}, \quad (16)$$

где  $f_{кр}$  – коэффициент крепости породы.

Схема для определения параметров свода естественного обрушения представлена на рисунке 16.

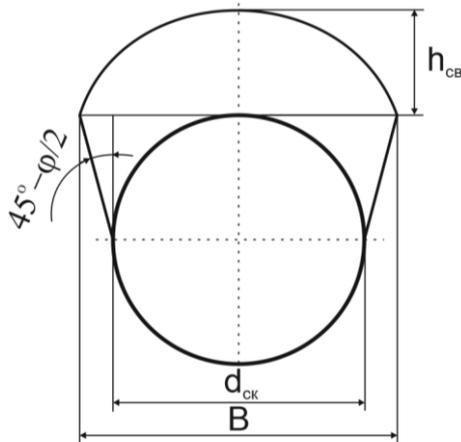


Рисунок 16 – Схема к расчету площади свода естественного обрушения

Площадь свода естественного обрушения над скважиной определяется по следующей формуле:

$$S_{св} = \left[ \frac{w^2}{2} \left( 2 \arcsin \frac{B}{2w} - \sin \left( 2 \arcsin \frac{B}{2w} \right) \right) \right] + \left( \frac{d_{ск} (B + d_{ск})}{4} - \frac{\pi d_{ск}^2}{8} \right), \quad (17)$$

где  $w = \frac{B^2 + 4h_{св}^2}{8h_{св}}$ .

Таким образом, при  $d_{ск} = 0,95$  м,  $\varphi = 35^\circ$  и  $f_{кр} = 0,7$  коэффициент извлечения  $k_{прох} = 2,05$ .

При извлечении шнека сразу после достижения расчётной глубины в конце скважины часть породы из свода естественного обрушения попадет в пустую скважину за пределами шнека – это совсем небольшой объем, которым в расчете производительности можно пренебречь.

При шнекобуровой отработке техногенных месторождений, сформированных в результате подземной добычи угля, одним из важнейших технологических параметров является ширина целиков между выемочными скважинами. При выборе ширины целиков, с одной стороны, необходимо обеспечить полную загрузку бурошнековой установки при извлечении породы из скважины, а с другой – ширина целиков должна быть такой, чтобы под действием горного давления происходило их разрушение.

Минимальная ширина целиков  $L_{min}$  обуславливается размерами сводов естественного обрушения породы над выемочной скважиной

$$L_{min} = B - d_{ск}. \quad (18)$$

Максимальная ширина целиков зависит от расстояния до поверхности отвала, диаметра выемочной скважины и свойств пород, слагающих техногенное месторождение (рисунок 17).

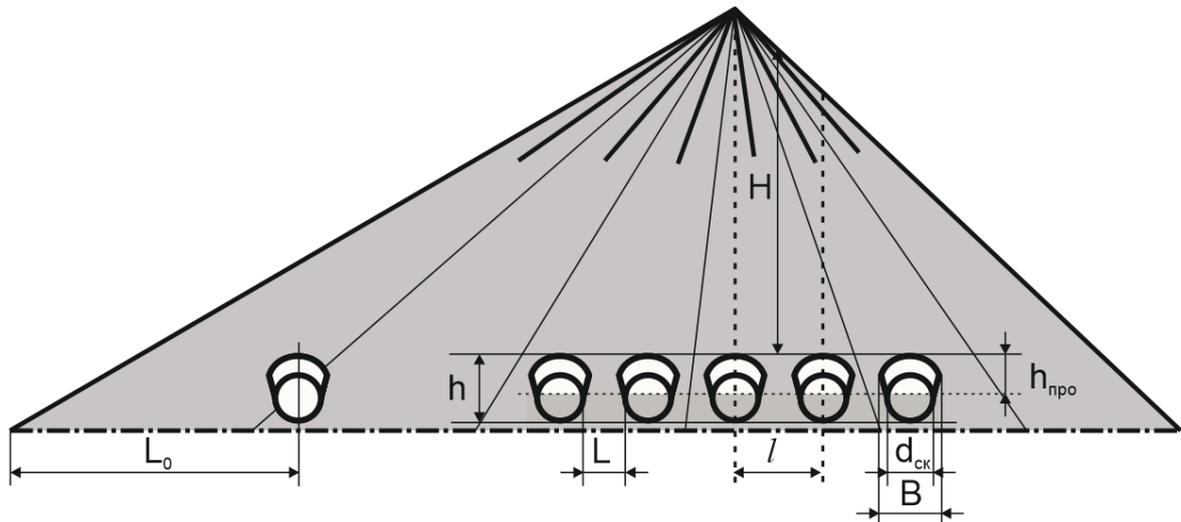


Рисунок 17 – Схема к определению основных технологических параметров бурошнековой отработки техногенных месторождений

Для разрушения целиков должно соблюдаться следующее условие: величина напряжения в межскважинных целиках должна быть больше предела прочности целика на сжатие:

$$\frac{\gamma_{\text{ср}} H l}{l - B} > \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \sqrt{\frac{l - B}{d_{\text{ск}} + h_{\text{св}}}}. \quad (19)$$

В результате расчета напряжения в межскважинных целиках и их предела прочности при различных расстояниях до поверхности ТМ  $H_j$  и характеристиках пород был построен график (рисунок 18) для определения максимальной ширины межскважинных целиков ( $L_i = l_i - d_{\text{ск}}$ ).

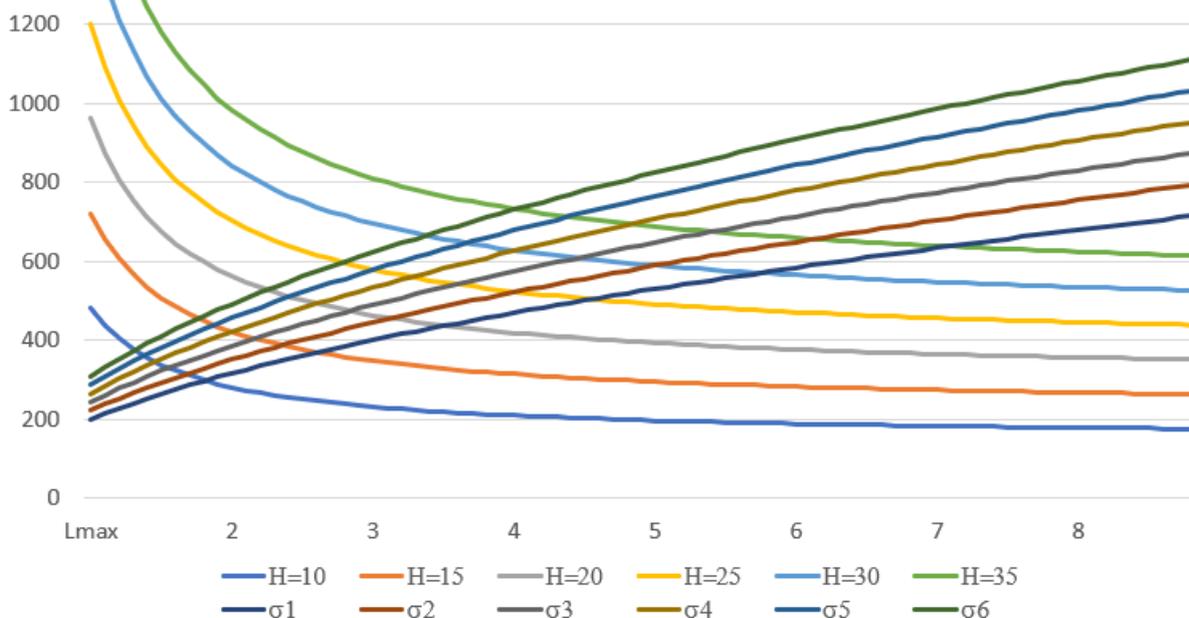


Рисунок 18 – График для определения максимальной ширины целиков

На основе произведенных расчетов предлагаются варианты технологических схем, предусматривающие отработку техногенных месторождений,

сформированных в результате добычи угля подземным способом, с бурением выемочных скважин по их короткой стороне, что обуславливается возможностями по наращиванию бурового става.

Предлагаемые технологические схемы можно разделить по расположению начала производства работ на периферийные (рисунок 19 а, в) и центральные (рисунок 19 б, г).

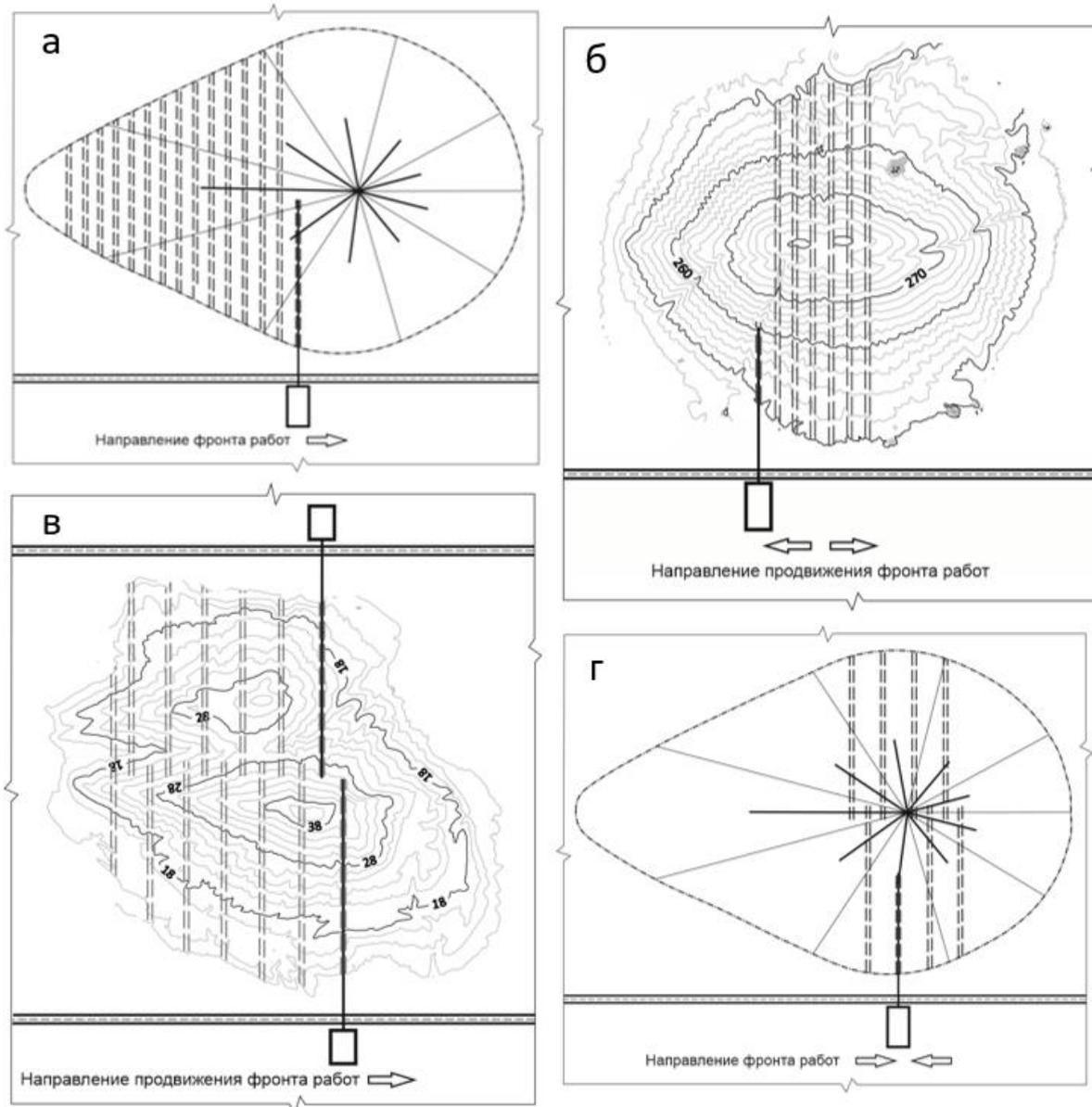


Рисунок 19 – Технологические схемы бурошнековой отработки техногенных месторождений: а – периферийная односторонняя; б – центральная односторонняя от центра; в – периферийная двухсторонняя; г – центральная двухсторонняя к центру

Периферийные технологические схемы подходят для применения на техногенных месторождениях, сформированных в результате канатной откатки породы в скипах или вагонетках по рельсовому пути или доставки породы конвейерным транспортом, т. к. угол откоса пологого склона месторождения в этих случаях не будет превышать 20–30°. В процессе осуществления периферийной

технологической схемы при бурении первой скважины от начала пологого края месторождения необходимо отступить расстояние  $L_0$  (рисунок 17), определяемое следующим образом.

Если предельная высота вертикального откоса  $h_{90} > h$ , то

$$L_0 = \frac{2C \cos \varphi}{\gamma_{\text{ср}}(1 - \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha} + \frac{B}{2}, \quad (20)$$

где  $\alpha$  – угол откоса пологого склона месторождения.

Если предельная высота вертикального откоса  $h_{90} \leq h$ , то

$$L_0 = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{B}{2}, \quad (21)$$

где  $h = d_{\text{ск}} + h_{\text{св}}$  – высота целика.

В этом случае породы техногенного месторождения будут проседать над скважиной, а не сдвигаться по откосу, что позволит избежать увеличения площади поверхности месторождения.

Для отработки хребтовых отвалов необходимо применять центральные технологические схемы. На рисунке 19 б представлена центральная односторонняя технологическая схема отработки породного отвала шахты № 13 «Мостовская» с направлением продвижения фронта работ от центра.

Если общей длины бурового става недостаточно для отработки месторождения на всю ширину, то бурение скважин производится с двух сторон месторождения – двухсторонняя схема (рисунок 19 в, г). На рисунке 19 в представлена периферийная технологическая схема отработки породного отвала шахты «Западно-Щекинская 17-бис».

В сложных геомеханических ситуациях необходимо использовать центральные односторонние или двухсторонние технологические схемы с направлением продвижения фронта работ к центру. В этом случае будет происходить плавное понижение верхушки техногенного месторождения.

Величина просадки поверхности зависит от ширины целиков, диаметра скважин и высоты свода естественного обрушения над скважинами (рисунок 17):

$$h_{\text{про}} = \frac{Lh}{L + d_{\text{ск}}}. \quad (22)$$

Для предотвращения пылеобразования из скважин при разрушении целиков и просадке породы достаточно применять местное пылеподавление путем орошения устьев скважин.

Достоинствами шнекобуровой отработки техногенных месторождений являются: использование техники относительно непрерывного действия; высокая производительность; отсутствие необходимости вскрытия месторождения; относительно небольшие эксплуатационные расходы; минимизация новых породных обнажений; отсутствие переэкскавации породы; работа без использования техники на поверхности отвала и без присутствия там людей; возможность селективной отработки месторождения.

Технология консервации техногенных месторождений представлена на рисунке 20.

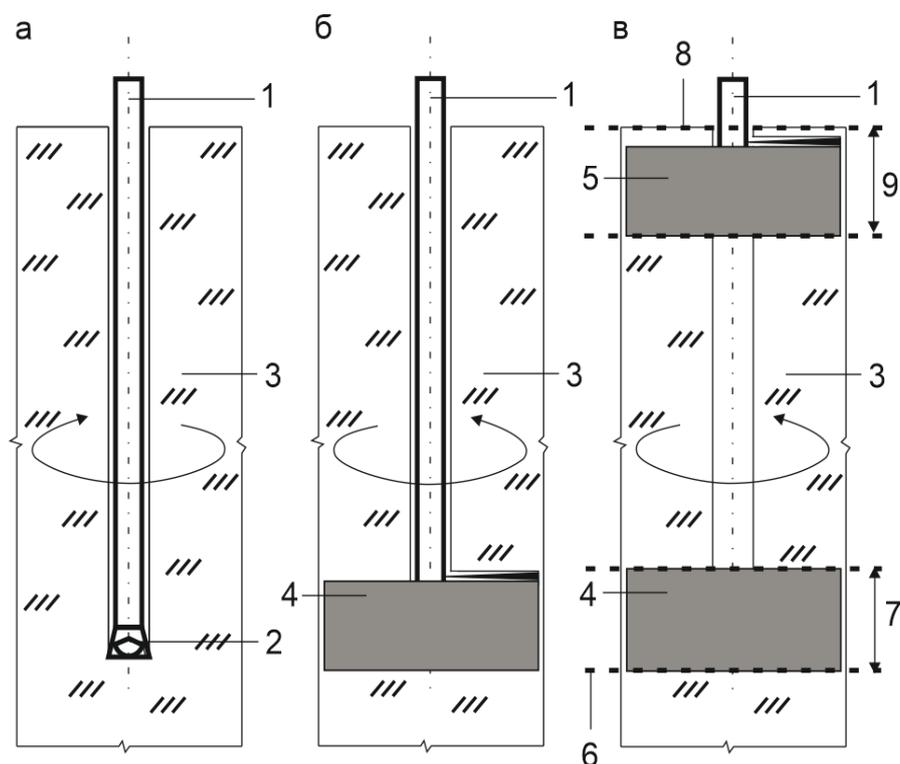


Рисунок 20 – Технологическая схема консервации потенциального техногенного месторождения: а – бурение пилотной скважины; б – формирование подошвенного экрана; в – формирование поверхностного экрана: 1 – буровой став; 2 – буровой инструмент; 3 – породный массив; 4 – подошвенный экран; 5 – поверхностный экран; 6 – расчетная глубина нижней границы подошвенного экрана; 7 – расчетная мощность подошвенного экрана; 8 – поверхность ТМ; 9 – расчетная мощность поверхностного экрана

Производится бурение пилотных скважин до расчетной глубины. Нагнетание водоцементного раствора под высоким давлением осуществляется при подъеме буровой колонны через струеформирующие насадки, которые направлены перпендикулярно оси пробуренной скважины. При этом колонна вращается с частотой 10 – 25 об/мин. Струя водоцементного раствора с высокой кинетической энергией режет и перемешивает породы, формируя цилиндрический массив из породобетона с диаметром, во много раз превышающим диаметр скважины. Нагнетание водоцементного раствора прекращают после доведения мощности водонепроницаемого экрана до необходимой. Далее продолжают поднимать буровую колонну и при достижении нижней границы поверхностного водонепроницаемого экрана возобновляют нагнетание высоконапорного водоцементного раствора. Производится создание водонепроницаемого экрана на поверхности техногенного образования.

Размеры сетки скважин рассчитывают таким образом, чтобы массивы породобетона соседних скважин формировались с перекрытием, необходимым для образования сплошного водонепроницаемого экрана.

Использование данной технологии позволяет: расширить возможности увеличения запасов минеральных ресурсов при наличии потенциала извлечения в будущем полезных компонентов из техногенных минеральных образований; обеспечить безопасность выполнения работ на поверхности породных отвалов угольных шахт за счет последовательного формирования закрепленных слоев породобетона; устранить негативное воздействие потенциальных техногенных месторождений на окружающую среду.

Разработан алгоритм (рисунок 21), позволяющий осуществлять выбор направления использования техногенных минеральных образований в масштабах угледобывающего региона, а также технологии для реализации выбранного направления, для определенных условий конкретного объекта.

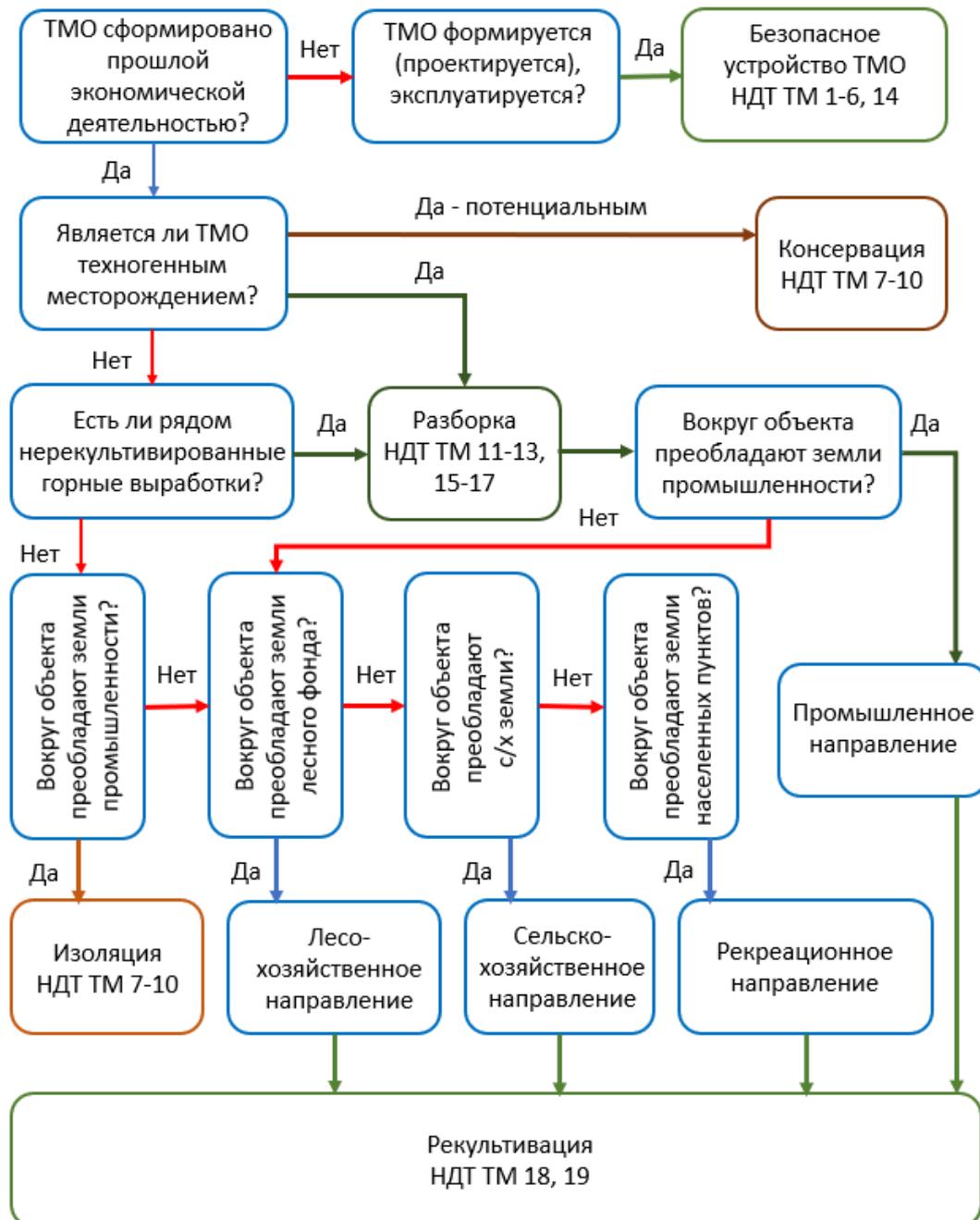


Рисунок 21 – Алгоритм выбора направления использования ТМО в масштабах угледобывающего региона

Окончательный выбор технологии и очередность ее реализации зависит от сравнения по степени негативного воздействия ТМ на окружающую среду, которая определяется в результате ранжирования ТМ.

Кроме выбора технологий, предлагается возможность определять направление рекультивационных работ для сформированных прошлой экономической деятельностью ТМО в зависимости от преобладающей категории земельных участков, расположенных вокруг ТМО.

Для определения преобладающих категорий земель в пределах зон влияния ТМ была произведена нормализация  $\min$ - $\max$ . В результате такой нормализации в пределах региона осуществляется масштабирование площадей по всем категориям земельных участков в зонах влияния ТМ в интервале  $[0,1]$ . Значения суммарных площадей земельных участков по категориям преобразуются по следующей формуле:

$$X = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}. \quad (23)$$

После нормализации все числовые значения входных признаков приведены к одинаковой области их изменения. Преобладающая категория земель выбирается путем сравнения числовых значений по категориям земель и выбора наибольшего для каждого ТМ.

Для условий Тульской области (рисунок 22) сельскохозяйственное направление рекультивации техногенных месторождений рекомендуется реализовывать в 60 случаях.

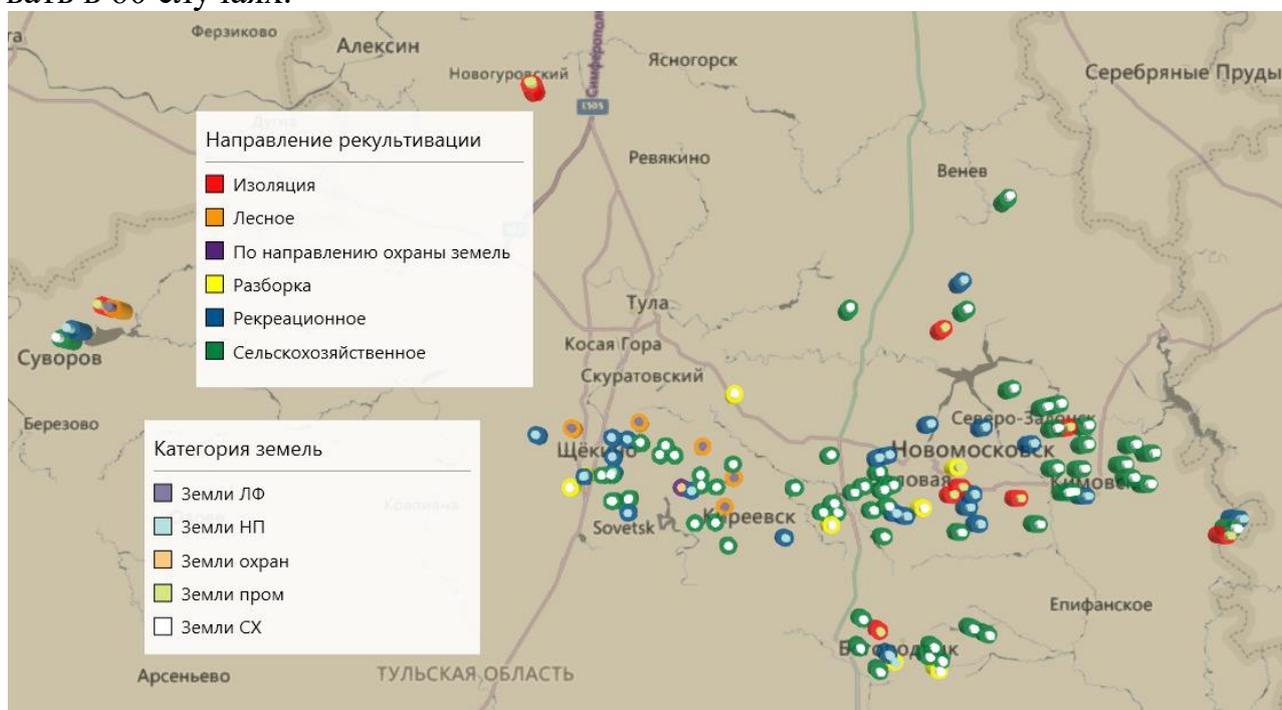


Рисунок 22 – Выбор направления использования насыпных ТМО в Тульской области

По 25 техногенным месторождениям рекомендуется применять рекреационное направление рекультивации, т. к. вблизи 24 ТМ преобладают земли населенных пунктов, а возле одного из техногенных месторождений расположен

земельный участок под строительство лечебного учреждения с категорией «земли особо охраняемых территорий и объектов». Лесное направление рекультивации должно быть использовано при рекультивации 6 ТМ. Еще 10 ТМ достаточно будет изолировать от окружающей среды, т. к. в их зонах влияния преобладают земли промышленности.

*В шестой главе проведено ранжирование техногенных месторождений по очередности их освоения. Произведена оценка технологий освоения и сохранения ресурсов техногенных месторождений.*

В набор данных для кластеризации техногенных месторождений входят: площади, занимаемые техногенными месторождениями; суммы площадей частей земельных участков той или иной категории, входящих в ту или иную буферную зону, с учетом весовых коэффициентов категорий земель и буферных зон.

Результаты ранжирования техногенных месторождений по очередности освоения и сохранения ресурсов для угледобывающих регионов представлены на рисунках 23 – 24.

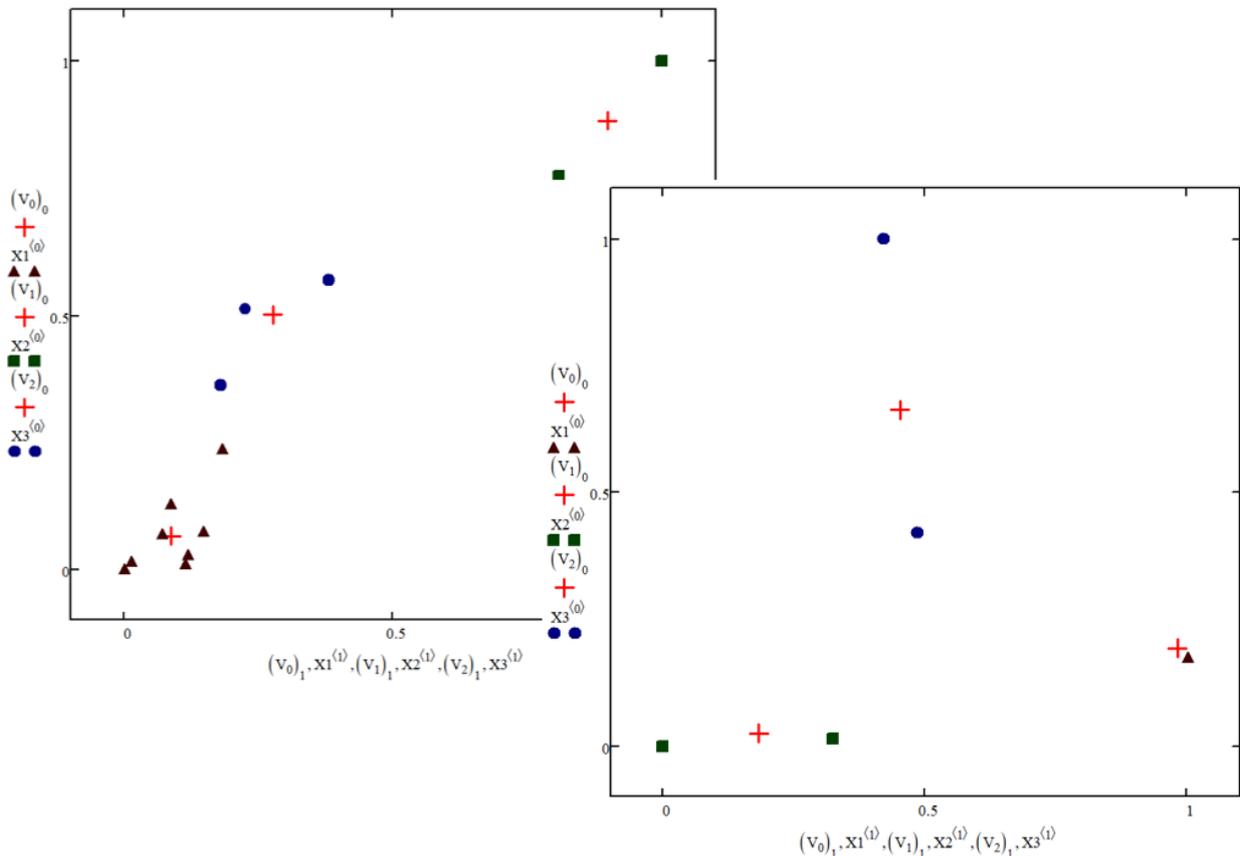


Рисунок 23 – Диаграммы кластеризации ТМ Кузнецкого и Донецкого угольных бассейнов

В Тульской области исследовано 109 техногенных месторождений, представленных отвалами угольных шахт. В Кемеровской области – 13 ТМ. В Ростовской области – 5 ТМ.

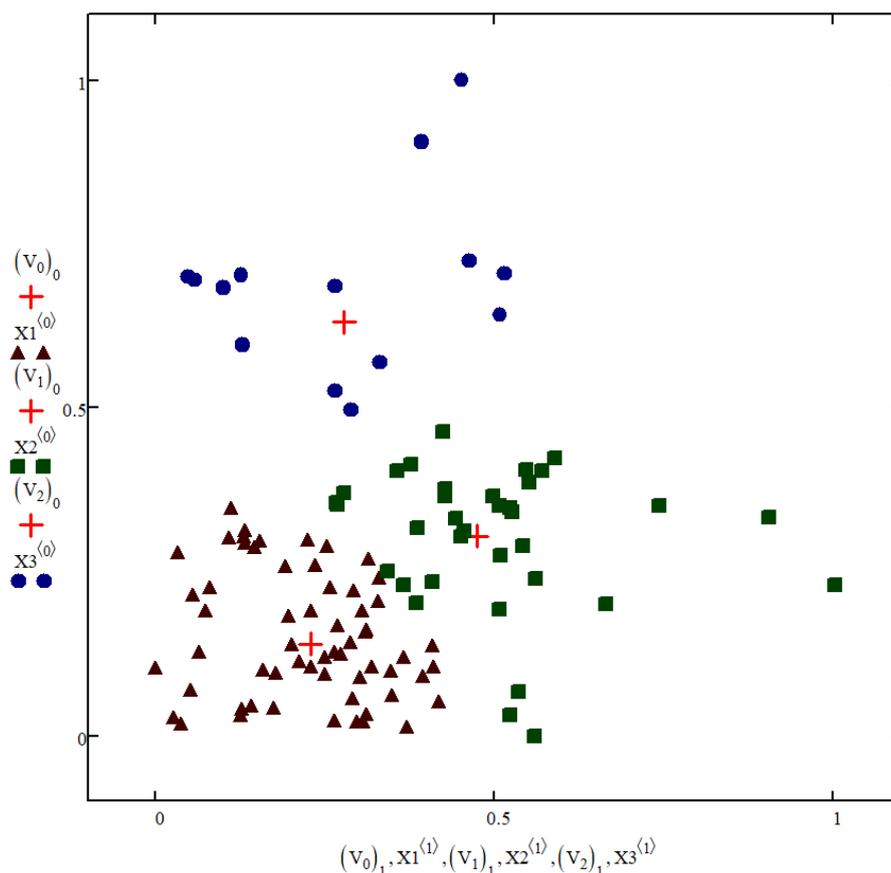


Рисунок 24 – Диаграмма кластеризации ТМ Подмосковского угольного бассейна

Анализ результатов кластеризации позволил определить очередность освоения и сохранения ресурсов техногенных месторождений по угледобывающим регионам. I очередь – в зонах влияния ТМ этого кластера показатель площади земель относительно высок, но для освоения и сохранения ресурсов ТМ потребуются затраты ниже средних, так как площади самих ТМ относительно небольшие, II очередь – техногенные месторождения с относительно небольшой площадью, при этом приведенная площадь земельных участков в зонах влияния ТМ тоже невелика, III очередь – приведенные площади земельных участков, подвергающиеся негативному влиянию ТМ, относительно невелики, а для освоения и сохранения ресурсов ТМ потребуется наибольшее количество затрат.

Для оценки технологий обработки техногенных месторождений и консервации потенциальных техногенных месторождений использовался метод экспертной оценки.

Существующие технологии разборки техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт, реализуются в основном в два этапа (рисунок 25).

Оценка технологий обработки техногенных месторождений производилась с привлечением группы экспертов, состоящей из 7 ученых, имеющих степень доктора технических наук по научной специальности «Геотехнология, горные машины». Общим решением экспертов было принято не проводить определение компетентности каждого из них и считать их компетентность равной.

Формирование перечня критериев проводилось в два тура. В общий перечень критериев вошли: безопасность для окружающей среды; безопасность производственная; необходимость вскрытия месторождения; непрерывность; возможность селективной выемки.

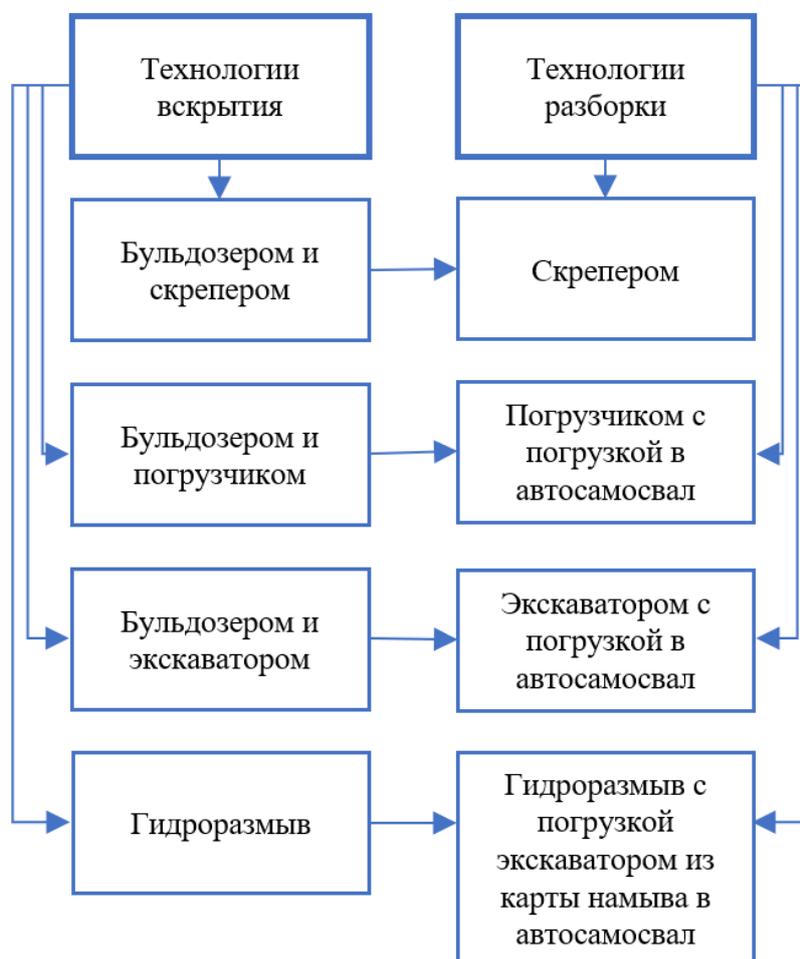


Рисунок 25 – Технологии для отработки техногенных месторождений, представленных конусными или хребтовыми отвалами

По каждому критерию было подготовлено краткое описание для одинаковой трактовки их значимости.

Обобщенная экспертная оценка весомости критериев для оценки технологий отработки техногенных месторождений рассчитывается следующим образом:

$$Q_i = \frac{k_1 \sum_{j \in P} q_j + k_2 \sum_{j \in G} q_j}{k_1 p + k_2 g}, \quad (24)$$

где  $q_j$  – значение из экспертной оценки веса  $i$ -го критерия ( $j = \overline{1, N}$ , где  $N$  – количество экспертов;  $i = \overline{1, M}$ , где  $M$  – количество критериев);  $p$  – количество элементов множества  $P$ ,  $g$  – количество элементов множества  $G$ ;  $P$  и  $G$  – множества экспертных оценок, образовавших положительные и отрицательные

отклонения от средней оценки;  $k_1$  и  $k_2$  – индексы отрицательных и положительных отклонений экспертных оценок от средней.

Нормированная экспертная оценка весомости критериев для оценки технологий отработки техногенных месторождений определяется по следующей формуле:

$$Q_i' = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^M Q_i}. \quad (25)$$

Результаты определения весомости критериев представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определение весомости критериев для оценки технологий отработки техногенных месторождений

Показатель	Критерий				
	Безопасность для ОС	Безопасность производственная	Необходимость вскрытия месторождения	Непрерывность	Возможность селективной выемки
$Q_i$	9,86	9,36	8,64	8,60	8,00
$Q_i'$	0,22	0,21	0,22	0,19	0,18

Определение баллов качества по каждому критерию для каждой технологии производилось на общем совещании всех членов экспертной группы.

Значения баллов качества были приняты следующие: 0 – «технология не соответствует данному критерию», 1 – «технология частично соответствует данному критерию», 2 – «технология полностью соответствует данному критерию». Результаты экспертной оценки рассмотренных технологий приведены на рисунке 26.

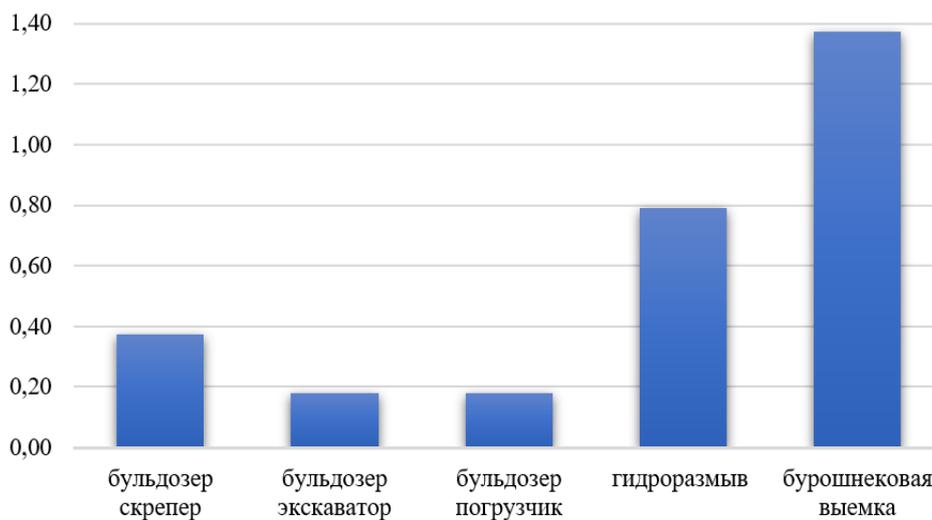


Рисунок 26 – Результат оценки технологий отработки техногенных месторождений

Использование бурошнековой выемки признано экспертами наиболее эффективной и безопасной технологией для отработки техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт.

Оценка технологий консервации потенциальных техногенных месторождений производилась по вышеописанной методике экспертной оценки. Технологии консервации насыпных потенциальных техногенных месторождений можно разделить на технологии закрепления пылящих поверхностей и противофильтрационные технологии (рисунок 27).

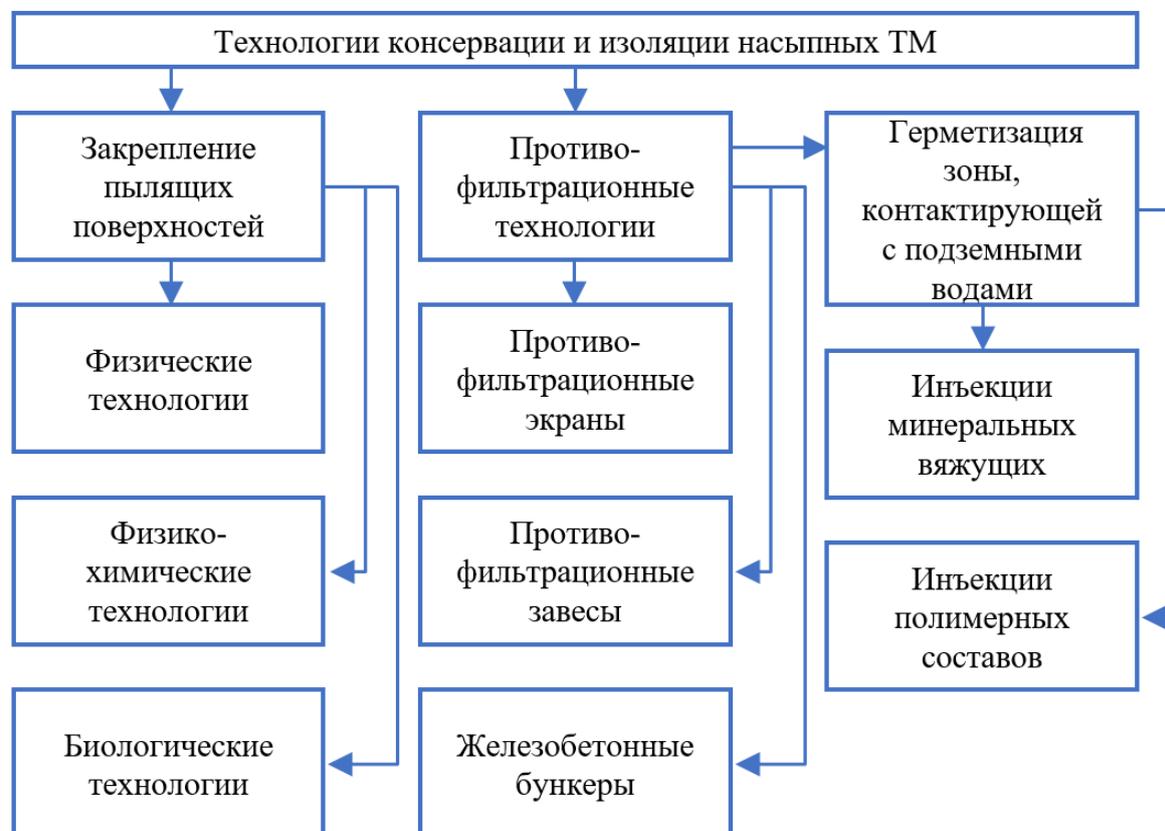


Рисунок 27 – Технологии консервации и изоляции насыпных техногенных месторождений

Формирование перечня критериев проводилось в два тура. В общий перечень критериев вошли: срок службы (критерий 1); объем затрат (критерий 2); защита от водной эрозии (критерий 3); возможность применения на сформированных объектах (критерий 4); защита от воздушной эрозии (критерий 5); защита от фильтрации воды (критерий 6); защита от деформаций (критерий 7).

По каждому критерию было подготовлено краткое описание для одинаковой трактовки их значимости.

Результаты определения весомости критериев представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения весомости критериев для оценки технологий консервации и изоляции потенциальных техногенных месторождений

Показатель	Критерии						
	1	2	3	4	5	6	7
$Q_i$	9,80	9,80	7,64	7,40	7,00	6,20	6,12
$Q_i'$	0,18	0,18	0,15	0,14	0,13	0,11	0,11

Определение баллов качества по каждому критерию для каждой технологии производилось на общем совещании всех членов экспертной группы.

Значения баллов качества были приняты следующие: 0 – «технология не соответствует данному критерию», 1 – «технология частично соответствует данному критерию», 2 – «технология полностью соответствует данному критерию». Результаты экспертной оценки рассмотренных технологий приведены на рисунке 28.

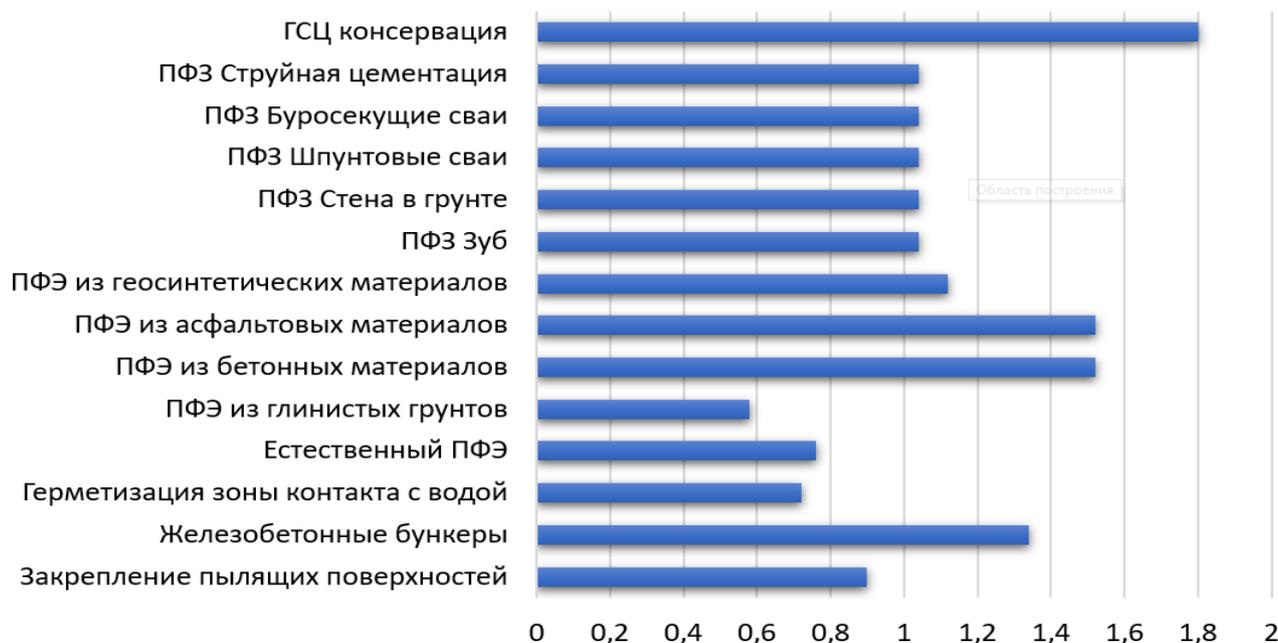


Рисунок 28 – Результат оценки технологий консервации и изоляции потенциальных техногенных месторождений

Экспертная оценка показала, что наиболее эффективной и безопасной технологией консервации потенциальных техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт, является технология, основанная на использовании гидроструйной цементации для всесторонней изоляции объекта породобетонным экраном.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований обоснованы технологические решения для освоения и консервации ресурсов техногенных месторождений угледобывающего региона на основе оценки их воздействия на окружающую среду, что имеет важное значение для угольной промышленности и повышение качества жизни людей в России.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1 Усовершенствованы математические модели для определения зон влияния деформаций техногенных месторождений, переноса пыли и газовых загрязнителей с поверхности техногенных месторождений в приземном слое атмосферы, миграции токсичных компонентов в почву, инфильтрации стоков с поверхности техногенных месторождений на прилегающие территории.

2 Разработаны методические положения и предложена структурно-функциональная схема комплексного мониторинга для оценки техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду и оценки способов снижения такого воздействия с использованием зон влияния источника загрязнения в зависимости от основных факторов влияния.

3 На основе результатов натурных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов определены количество и параметры зон влияния техногенных месторождений на окружающую среду в зависимости от основных факторов влияния.

4 Определены наилучшие доступные технологии для снижения или исключения негативного воздействия насыпных техногенных минеральных образований.

5 Определены основные параметры шнекобуровой отработки техногенных месторождений, для расчёта производительности бурошнековой выемки определен коэффициент, учитывающий размеры свода естественного обрушения над скважиной.

6 Установлены закономерности изменения напряженного состояния межскважинных целиков от их размеров, отличающиеся учетом сцепления и угла внутреннего трения пород и позволяющие обосновать параметры бурошнековой выемки с заданным диаметром скважин на различной глубине при освоении техногенных месторождений.

7 Предложена технология сохранения ресурсов потенциальных техногенных месторождений, основанная на гидроструйной цементации пород, позволяющая изолировать породы потенциальных техногенных месторождений от взаимодействия с агрессивными природными факторами.

8 Обоснован способ выбора направления рекультивации для сформированных прошлой экономической деятельностью техногенных минеральных образований и техногенных месторождений в зависимости от преобладающей категории земельных участков, расположенных в зоне их влияния.

9 Обосновано применение нечеткой кластеризации для ранжирования техногенных месторождений в масштабах угледобывающего региона, позволяющего определять очередность освоения и сохранения ресурсов данных объектов.

10 В процессе экспертной оценки сформирован перечень особенно значимых критериев для оценки технологий отработки техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт, и выявлена наиболее эффективная, безопасная и экономически целесообразная технология для применения в масштабах угледобывающего региона.

11 На основе сформированного перечня критериев методом экспертных оценок выявлена наиболее эффективная, безопасная и экономически целесообразная технология консервации потенциальных техногенных месторождений, представленных породными отвалами угольных шахт.

**Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:**

***Издания, входящие в международную систему цитирования Scopus и Перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:***

1 Выбор технологий и направлений снижения техногенного воздействия минеральных образований на окружающую среду / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Д.О. Прохоров, О.А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 1(59). С. 283-291.

2 Обоснование технологии освоения техногенных месторождений / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Д.О. Прохоров, О.А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 3(61). С. 833-841.

***Издания, входящие в международную систему цитирования Web of Science и Перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:***

3 Разработка технологии консервации потенциальных техногенных месторождений / Н. М. Качурин, Г.В. Стась, Д. О. Прохоров, К. А. Головин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 3. С. 257-266.

4 Аэрогазодинамика и перенос пыли техногенных минеральных образований / Н. М. Качурин, Д. О. Прохоров, Д. А. Амбарцумов, И. А. Ерогин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 1. С. 531-543.

5 Моделирование параметров зон влияния вертикальной фильтрации загрязнителя и водной эрозии техногенных минеральных образований / Н.М. Качурин, Д.О. Прохоров, Д.А. Амбарцумов, И.А. Ерогин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 1. С. 544-554.

6 Моделирование воздействий водной эрозии техногенных минеральных образований на окружающую среду / Н.М. Качурин, Д.О. Прохоров, Г.Г. Лускин, Д.А. Амбарцумов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 3. С. 293-304.

7 Техногенное воздействие минеральных образований на компоненты окружающей среды / Н.М. Качурин, Д.О. Прохоров, Г.Г. Лускин, Д.А. Амбарцумов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 3. С. 305-314.

8 Ранжирование техногенных минеральных образований по степени влияния на окружающие земли / Д. О. Прохоров, Г. В. Стась, А. И. Болгова, С. М. Овсянников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 113-124.

9 Снижение или исключение негативного воздействия насыпных техногенных минеральных образований на окружающую среду / Д. О. Прохоров, Г. В. Стась, А. И. Болгова, М. Ю. Шамрин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 125-138.

10 Дистанционный геоэкологический мониторинг влияния

техногенных минеральных образований на окружающую среду / Д.О. Прохоров, Г.В. Стась, В.И. Сарычев, Я.Г. Небылова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 4. С. 105-115.

11 Прогнозирование загрязнения окружающей среды в результате деформаций техногенных минеральных образований / Д. О. Прохоров, Р. А. Ковалев, К. А. Головин, В. П. Сафронов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 76-85.

12 Совершенствование классификации техногенных минеральных образований / Д.О. Прохоров, В. Д. Кухарь, В.И. Сарычев, А.А. Подколзин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 501-512.

13 Аэродинамические характеристики прудов-отстойников закрытых фабрик по обогащению угля / Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, Д.О. Прохоров, Г.Э. Колесников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 2. С. 14-23.

14 Методические положения комплексной экологической оценки воздействия породных отвалов шахт на окружающую среду / В.И. Ефимов, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, Д.О. Прохоров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 3. С. 18-28.

15 Прохоров Д.О., Снежко И.И. Проблемы учета и регистрации отвалов горных пород в государственных кадастрах // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 1. С. 17-29.

16 Состояние окружающей среды в регионах размещения горного производства / Т.В. Корчагина, Г.В. Стась, Д.О. Прохоров, А.Е. Коряков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 40-53.

17 Прохоров Д.О., Сушков С.Л. Оценка экологической опасности породных отвалов угольных шахт на основе данных дистанционного зондирования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 1. С. 51-63.

18 Прохоров Д.О. Создание цифровой модели породного отвала угольной шахты на основе съемки беспилотным летательным аппаратом // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 1. С. 64-72.

19 Прохоров Д.О. Геомеханическое обеспечение горных работ при рекультивации терриконов угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 2. С. 163-171.

20 Прохоров Д.О. Методика определения геометрических параметров породных отвалов угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 4. С. 64-71.

***Издания, входящие в базу данных публикаций RSCI:***

21 Мониторинг земель, занятых техногенными минеральными образованиями / И.А. Басова, Д.О. Прохоров, С.В. Пьянков, Л.К. Трубина // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2022. Т. 27. № 4. С. 138-149.

22 Басова И.А., Прохоров Д.О., Пьянков С.В. Предложения по охране

земель от негативного воздействия техногенных минеральных образований // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26. № 5. С. 135-144.

23 Басова И.А., Прохоров Д.О., Пьянков С.В. О создании реестра техногенных минеральных образований // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26. № 6. С. 107-116.

***Издания, входящие в Перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:***

24 Прохоров Д.О. Карьер-полигон ТБО – перспективное комплексное производство // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2011. № 1. С. 166-170.

25 Прохоров Д.О. Прогнозирование геомеханических ситуаций при добыче известняка // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 173-178.

***Патенты РФ и охранные документы:***

26 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617512 Российская Федерация. Программа для геоэкологического дистанционного зонального мониторинга техногенных минеральных образований «ГеоТМО»: № 2023616686: заявл. 05.04.2023: опубл. 11.04.2023. Бюл. № 4. 3 с.

27 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611070 Российская Федерация. Программа прогнозирования поведения породного массива: № 2022610348 : заявл. 13.01.2022 : опубл. 19.01.2022. Бюл. № 1. 1 с.

28 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613532 Российская Федерация. Программа автоматизированного расчета крепей горных выработок "Крепь Каретникова": № 2021612589: заявл. 01.03.2021: опубл. 10.03.2021. Бюл. № 3. 1 с.

29 Способ разборки конических и хребтовых техногенных минеральных образований: патент № 2773166 РФ. № 2021131581; заявл. 27.10.21; опубл. 31.05.22. Бюл. №16. 1 с.

30 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666300 Российская Федерация. Программа прогнозирования деформаций техногенных минеральных образований "Полярная" : № 2022665252 : заявл. 15.08.2022 : опубл. 30.08.2022. Бюл. № 9. 1 с.

31 Способ консервации и изоляции промышленных отвалов: пат. 2636174 РФ. № 2016139713; заявл. 10.10.16; опубл. 21.11.17. Бюл. №33. 1 с.

***Прочие издания:***

32 Прохоров Д.О. Инвентаризация техногенных образований Подмосковского угольного бассейна // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : сб. докладов IX Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 06–07 апреля 2020 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2020. С. 226-231.

33 Прохоров Д.О. Учет и регистрация отвалов горных пород в

государственных кадастрах // 55-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ: сборник докладов, Тула, 04 – 08 февраля 2019 года / под ред. М. С. Воротилина. Том Часть 1. Тула: Тульский государственный университет, 2019. С. 227-234.

34 Копылов А.Б., Прохоров Д.О., Сушков С.Л. Совершенствование расчетной модели для исследования напряженного состояния породных отвалов угольных шахт // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы конференции, Тула-Минск-Донецк, 02–03 ноября 2016 года / под общ. ред. Р.А. Ковалева. Том 1. Тула-Минск-Донецк: Тульский государственный университет, 2016. С. 387-392.

35 Развитие идеи акад. А.Н. Крылова по расчету инженерно-строительных сооружений, взаимодействующих с податливой средой, методом начальных параметров / А.Б. Копылов, В.Ю. Котов, Д.О. Прохоров, А.Е. Харламов // Транспортное строительство. 2013. № 10. С. 29-31.