

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

*На правах рукописи*

КРАСНОЦВЕТОВ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ

Специальность 1.6.20

«Геоинформатика, картография»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент

Ческидов Василий Владимирович

Москва 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ.....	9
1.1 Цели, задачи и методы моделирования массива горных пород .....	9
1.2 Основные характеристики и инженерно-геологические особенности техногенных отложений .....	12
1.3 Факторы, определяющие устойчивость техногенных насыпных массивов.....	15
1.4 Анализ подходов в практике геоинформационного моделирования отвальных сооружений .....	20
1.5 Вывод по главе 1.....	25
2 ПОСТРОЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАРИЯ КАРКАСНОГО И БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ....	28
2.1 Оценка применимости принципов блочного и каркасного моделирования для построения геоинформационных моделей внешних отвалов угольных предприятий.....	28
2.2 Анализ инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений каменного угля Кузнецкого бассейна как объекта геоинформационного моделирования.....	32
2.3 Особенности строения Талдинского каменноугольного месторождения и технологии формирования внешних отвалов при его отработке .....	40
2.4 Создание структурных геоинформационных моделей отвалов, сформированных в результате добычи каменного угля .....	48
2.5 Выводы по главе 2.....	55
3 ИНТЕГРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОТЛОЖЕНИЙ ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННУЮ МОДЕЛЬ.....	58
3.1 Анализ показателей физико-механических свойств отложений в теле отвала угольных месторождений внешних отвалов.....	58
3.2 Оценка пространственной и временной изменчивости прочностных свойств техногенных отложений внешних отвалов .....	61
3.3 Выбор и обоснование метода интерполяции показателей физико- механических свойств техногенных отложений в теле отвала .....	66

3.4 Интерполяция данных внутри структур геоинформационной модели внешних отвалов угольных предприятий .....	70
3.5 Оценка достоверности модели .....	76
3.6 Выводы по главе 3 .....	79
<b>4 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ В КАЧЕСТВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ ..</b>	<b>81</b>
4.1 Интеграция данных гидрогеологических изысканий и мониторинга в геоинформационную модель внешнего отвала .....	81
4.2 Прогнозирование распределения прочностных показателей отложений внешних отвалов с использованием построенной геоинформационной модели .....	89
4.3 Разработка рекомендаций по использованию геоинформационной модели внешних отвалов при решении задач мониторинга их состояния, планирования и развития систем отвалообразования .....	95
4.4 Вывод по главе 4 .....	102
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>104</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>106</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>120</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Конец XX и начало XXI веков стали временем активного развития информационных технологий, данная тенденция не стала исключением и в области обработки пространственных данных. Были разработаны новые подходы формирования баз данных и геоинформационных методов их анализа и представления. В добывающей отрасли широкое распространение получили горно-геологические информационные системы, которые стали основным инструментом для моделирования геологических объектов, горных выработок, отвалов и т.д. В то же время практика внедрения современных ГИС-технологий на горнодобывающих предприятиях показывает, что потенциал данных IT-решений еще далеко не исчерпан и может быть использован при решении задач мониторинга и оценки состояния техногенных объектов, включая отвалы, хвостохранилища, дамбы, что в конечном итоге позволит принимать своевременные управленческие решения для повышения безопасности их эксплуатации. [1, 2].

На сегодняшний день разработка угольных месторождений ведется преимущественно открытым способом. Осложнение горно-геологических условий, увеличение глубины, а также интенсификация добычи способствуют значительному росту скорости формирования техногенных массивов. Новейшая карьерная техника позволяет перемещать большие объемы горной массы при отработке месторождений, что приводит, в свою очередь, к уменьшению свободных площадей для формирования породных отвалов и увеличению размеров уже существующих техногенных сооружений [3]. С условием все большего внедрения предприятиями горнодобывающего сектора горно-геологических информационных систем, специализированного программного обеспечения, появляется возможность прогнозирования состояния формируемого отвала на основе цифровой модели с возможностью обновления данных, полученных на горном предприятии, в том числе в реальном времени [4].

В связи с вышеизложенным, моделирование внешних породных отвалов угольных разрезов с применением геоинформационных принципов является актуальной научной задачей для отечественной и зарубежной науки, которая позволит оценить распределение физико-механических свойств массива; планировать и принимать проектные решения на объекте; обеспечить безопасное ведение горных работ, в части отвалообразования; использовать специализированное горно-геологическое программное обеспечение, как единый комплекс от разведки до эксплуатации месторождения, включая также процесс отвалообразования.

**Целью работы является** обоснование принципов геоинформационного моделирования внешних отвалов угольных разрезов для решения задач по их безопасной эксплуатации, а также хранению геопространственных данных об исследуемых техногенных массивах.

**Идея работы заключается** в совершенствовании геоинформационного моделирования внешних отвалов угольных разрезов на основе интеграции разнородных пространственных данных, выявления и анализа изменения прочностных характеристик горных пород со временем нахождения в теле техногенного массива.

**Задачи исследования:**

- анализ современного инструментария геоинформационного моделирования и условий формирования внешних отвалов, состоящих из горных пород, подвергающихся быстрому выветриванию в приповерхностных условиях;
- определение математических зависимостей пространственно-временной изменчивости характеристик отложений внешних отвалов угледобывающих предприятий;
- обоснование применимости инструментария каркасного и блочного моделирования для создания цифровых моделей внешних отвалов;
- разработка принципов геоинформационного моделирования внешних отвалов, базирующихся на интеграции принципов каркасного и

блочного моделирования, а также выявленных зависимостей пространственно-временной изменчивости показателей физико-механических характеристик техногенных отложений;

– обоснование структуры геоинформационного обеспечения для решения задач по проектированию, планированию и организации горных работ, управлению состоянием техногенных массивов применительно к условиям открытой разработки угольных месторождений;

– разработка рекомендаций по реализации геоинформационного метода моделирования внешних отвалов для условий Талдинского каменноугольного месторождения.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту.**

1. Геоинформационное моделирование внешних отвалов, сложенных из горных пород, подвергающихся быстрому выветриванию в приповерхностных условиях необходимо производить на основе принципов блочного моделирования, учитывая пространственно-временную изменчивость характеристик техногенных отложений и вариативности гидрогеологических условий.

2. Базисом построения цифровой модели внешних отвалов угольных разрезов являются зависимости от времени изменения физико-механических свойств и вещественного состава техногенных отложений, которые показывают, что в течение первых десяти лет сцепление увеличивается по экспоненциальной функции, а угол внутреннего трения – уменьшается, согласно линейной.

3. Предложенная структура построения геоинформационной модели внешних отвалов угледобывающих карьеров является платформой для хранения горно-геологических данных, а также информационным обеспечением системы мониторинга состояния внешних отвалов угольных разрезов.

**Научная новизна исследования:** разработан новый методический подход к формированию геоинформационных моделей внешних отвалов угольных карьеров, включающий:

- принципы блочного моделирования и разделение техногенного массива на участки в соответствии со временем их формирования; характеристики пространственно-временной изменчивости параметров техногенных отложений; установленные пространственно-временные зависимости изменения угла внутреннего трения и сцепления отложений внешних отвалов;

- структуру геоинформационного обеспечения отвалообразования на угольных карьерах.

**Научное и практическое значение работы заключается в:**

- разработке методического подхода по построению интегрированной цифровой среды для оперативной оценки состояния внешних отвалов угледобывающих предприятий;

- создании структуры и этапности геоинформационного моделирования внешних отвалов угольных разрезов;

- разработке рекомендаций, позволяющих принимать решения по увеличению вместимости отвалов, повышению промышленной и экологической безопасности техногенных сооружений на основе предложенных подходов по формированию геоинформационного обеспечения системы мониторинга состояния внешних отвалов угольных разрезов;

- использовании результатов диссертационного исследования при формировании геомеханической модели месторождения на Талдинском каменноугольном месторождении.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждаются:**

- применением обоснованного комплекса общепризнанных методов изучения свойств техногенных сооружений (отвалов);

– реализацией исследований техногенных сооружений с использованием сертифицированного оборудования с высокоточными метрологическими характеристиками;

– использованием математических методов прогнозирования значений физико-механических свойств отложений отвальных насыпей;

– применением программного обеспечения для геоинформационного моделирования внешних отвалов угольных разрезов.

**Апробация работы.** Результаты проведенного диссертационного исследования, рекомендации и основные научные положения были представлены на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах:

Международных научных симпозиумах «Неделя горняка-2023» (Москва, 30 января – 3 февраля 2023 года), «Неделя горняка-2024» (Москва, 29 января – 2 февраля 2024 года), «Неделя горняка-2025» (Москва, 3 февраля – 7 февраля 2025 года), «Неделя горняка-2026» (Москва, 2 февраля – 6 февраля 2026 года); XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 29 мая – 01 июня 2024); семинарах кафедры геологии и маркшейдерского дела НИТУ МИСИС в период с 2023 по 2026 годы.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 4 научных работах, в том числе 3 – х изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и индексируемых базой данных Scopus.

# **1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ**

## **1.1 Цели, задачи и методы моделирования массива горных пород**

Породные отвалы угольных месторождений представляют собой сложные инженерно-геологические системы, формирующиеся в результате добычи и переработки угля. Их устойчивость и безопасность эксплуатации напрямую зависят от точности прогнозирования геомеханических процессов, что требует детального анализа структуры и свойств горных пород. Принципы геоинформационного моделирования позволяет создать цифровую основу для оценки рисков, проектирования защитных мероприятий и оптимизации эксплуатации отвальных сооружений. В данном разделе рассматриваются ключевые цели, задачи и методы, применяемые при разработке геоинформационных моделей породных массивов, а также приводятся практические примеры и алгоритмы работы [5].

Геоинформационное моделирование внешних отвалов угольных карьеров представляет собой комплексный процесс, направленный на обеспечение устойчивости и безопасности породных отвалов угольных месторождений. Основная цель моделирования заключается в создании инструмента для управления их состоянием, оптимизации проектных решений и минимизации экологических рисков и ущерба. Ключевые задачи включают построение каркасной и блочной моделей отвала, оценку степени обводненности, физико-механических свойств в различных частях тела насыпи, прогнозирование других параметров, влияющих на устойчивость [6].

Для достижения этих целей необходимо последовательное решение научно-практических задач:

- сбор и систематизация исходных данных: геологической информации (литологический состав, стратиграфия, данные бурения), маркшейдерских

данных (топографические съемки поверхностей) гидрогеологических условий (уровень грунтовых вод, фильтрационные свойства) и техногенных факторов (параметры складирования);

- разработка блочной модели с использованием программного обеспечения горно-геологических информационных систем, предполагающих оценку массива, сложенного нарушенными в результате горных работ породами;
- сбор данных о техногенном массиве в процессе инженерно-геологических изыскательских работ с использованием информации о местоположении и складированных горных пород в тело отвала;
- анализ полученных данных и выявление зависимости об изменении физико-механических параметров пород, претерпевших изменения от времени нахождения в массиве с учетом факторов выветривания и антропогенного влияния;
- оценка геоинформационной блочной модели при помощи статистических математических методов [7];
- прогнозирование параметров техногенного массива.

Моделирование породных отвалов угольных месторождений имеет специфические особенности. Например, необходимо учитывать соотношение отсыпаемых пород (глин, суглинков, коренных пород) в связи с непосредственным влиянием на формирование физико-механических свойств в отвальном сооружении [8]. Динамичность системы, связанная с постоянным изменением геометрии отвалов в процессе эксплуатации, требует адаптации моделей.

Опыт эксплуатации высоких и сверхвысоких техногенных объектов свидетельствует о наличии значительных геодинамических рисков, сопутствующих их функционированию. При этом аварийные ситуации определяют значительные негативные экологические и экономические последствия, в некоторых случаях могут приводить к человеческим жертвам. В последние десятилетия были зафиксированы деформации в виде оползней на

внешних отвалах разрезов «Заречный» (рисунок 1), «Виноградовский», «Кыргайский Средний», «Черниговец». Масштабы произошедших горно-геологических явлений подтверждают серьезность проблемы: например, на разрезе «Заречный» объем пород, вовлеченных в оползневой процесс, составил 27 млн м<sup>3</sup>, что потребовало выделения около 8 млрд руб. на ликвидацию ущерба. Итогом аварии на объекте «Черниговец» стала гибель трех человек. Анализ данных показывает, что на момент развития негативных геодинамических процессов высота указанных горнотехнических сооружений превышала 100 метров, что показывает зависимость устойчивости отвальных массивов от их геометрических параметров.



Рисунок 1 – Последствия оползня на отвале участка «Заречный»

Таким образом, методы геоинформационного моделирования породных отвалов угольных месторождений – это процесс, объединяющий полевые исследования, сбор и систематизацию лабораторных испытаний и цифровые технологии. Оно служит основой для принятия управленческих решений, направленных на организацию безопасности при ведении горных работ, а также минимизацию возможного экологического воздействия на окружающую среду. Современные технологии, такие как машинное обучение для анализа больших данных и искусственный интеллект, открывают новые возможности для

повышения точности прогнозов и усовершенствования технологических процессов на предприятии. Оптимизация алгоритмов работы метода и использование новых технологий остаются ключевыми направлениями для дальнейших исследований.

## **1.2 Основные характеристики и инженерно-геологические особенности техногенных отложений**

Техногенные отложения, формирующиеся в результате добычи и переработки угля, представляют собой сложные инженерно-геологические системы антропогенного происхождения. Эти искусственные массивы, включающие породные отвалы, хвостохранилища и насыпные грунты, характеризуются высокой степенью неоднородности как в пространственном, так и во временном аспекте. Их состав формируется под влиянием геологических условий месторождения и применяемых технологий, что предопределяет вариативность физико-механических свойств в пределах одного сооружения. Техногенные массивы, формируемые в процессе угледобычи, характеризуются сложным литологическим строением, включающим вскрышные породы: от глинистых отложений и суглинков четвертичного возраста до полускальных и скальных разностей, а также техногенных продуктов переработки угля (шламов, золы, хвостов обогащения). Столь выраженная неоднородность вещественного состава обуславливает формирование в пределах одного сооружения зон с различными физико-механическими характеристиками, что необходимо учитывать при проведении расчетов устойчивости и оценке геомеханических рисков.

В условиях Кузнецкого угольного бассейна размещение вскрышных пород во внешние отвалы реализуется преимущественно по двум технологическим схемам: «сухой» отсыпке и гидравлическому складированию. При «сухом» способе в тело отвала укладываются дезинтегрированные породы углевмещающей толщи – песчаники, алевролиты, аргиллиты на различных типах

цемента (карбонатном или глинистом). Присутствие глинистого материала в виде цемента определяет чувствительность пород к увлажнению в приповерхностных условиях: при контакте с водой при изменении температуры происходит размокание, которое приводит к значительному уменьшению прочности горных пород. Кроме того, при формировании отвалов в тело насыпи укладываются неоген-четвертичные суглинки и глины, которые при определённых гидрогеологических условиях могут выполнять функцию водоупорных экранов или становиться поверхностями потенциального смещения при достижении степени водонасыщения. Гидравлический способ, применяемый в меньшей степени, предполагает транспортировку породы в виде пульпы, что обеспечивает более плотную упаковку частиц, однако одновременно способствует росту порового давления и формированию специфических фильтрационных условий внутри массива [10, 11].

Площади, занимаемые внешними отвалами, достигают значительных масштабов – нередко свыше 1000 га, при этом высотные параметры сооружений варьируются в широких пределах. Одноярусные отвалы, формируемые под углом естественного откоса, обычно имеют высоту от 15 до 90 м, тогда как многоярусные конструкции достигают 40 – 160 м при меньшем значении генерального угла откоса (11–26°). В условиях дефицита земельных ресурсов вблизи действующих разрезов наблюдается устойчивая тенденция к наращиванию высоты эксплуатируемых отвалов до 300 м, а в некоторых случаях до 500 м и более [12].

Проведенный анализ свидетельствует о том, что при достижении высоты отвала более 100 м в массивах, сформированных породами кольчугинской серии, закономерно возникает техногенный водоносный горизонт. Данный феномен обусловлен спецификой вещественного состава отвальных пород: песчаники, алевролиты и аргиллиты кольчугинской серии содержат глинистый плёночный цемент, который под действием возрастающей нагрузки от вышележащих толщ способствует дроблению частиц и уменьшению размера порового пространства. Как следствие, снижается водопроницаемость массива (рисунок 2 и 3), и при

достижении определённого уровня вертикального напряжения атмосферные осадки перестают свободно инфильтроваться, накапливаясь в толще отвала и формируют локальные зоны полного водонасыщения [13].



Рисунок 2 – Техногенные отложения, сформированные породами кольчугинской серии (алевролиты, песчаники, глинистые породы)



Рисунок 3 – Состояние пород в теле отвала, сформировавшееся в результате их выветривания под действием атмосферных осадков и изменения температуры

Таким образом, формирование техногенных массивов при открытой разработке угля в Кузнецком бассейне представляет собой сложный

многофакторный процесс, требующий комплексного подхода к анализу и прогнозированию. На устойчивость внешних отвалов значительное влияние оказывают не только геометрические параметры, такие как высота сооружения и угол откосов, но и литологический состав, соотношение различных типов пород, а также технология их складирования. Существенную роль играют гидрогеологические условия, включая уровень техногенного водоносного горизонта. Совокупность этих факторов обуславливает необходимость применения современных методов геоинформационного моделирования, позволяющих интегрировать разнородные данные и создавать динамические цифровые модели, адекватно отражающие реальное состояние техногенных объектов.

### **1.3 Факторы, определяющие устойчивость техногенных насыпных массивов**

Вопросы, касающиеся инженерно-геологического и гидрогеологического обеспечения складирования вскрышных пород, а также обеспечения устойчивости откосных сооружений, являются ключевыми в трудах ряда российских и зарубежных специалистов, в том числе: Васильевой А.Д., Гальперина А.М., Демина А.М., Кириченко Ю.В., Киянец А.В., Коликова К.С., Кулона Ш.О., Кутепова Ю.И., Кутепова Ю.Ю., Кутеповой Н.А., Липиной А.В., Мироненко В.А., Мосейкина В.В., Пастихина Д.В., Пуневского С.А., Пустовойтовой Т.К., Решетняка С.П., Ржевского В.В., Сергиной Е.В., Терцаги К., Фисенко Г.Л., Ческидова В.В., Шешко Е.Ф., Шпакова П.С., Шушкина О.И., Щекиной М.В., Dawson E.M., Roth W.H., Zhang XQ, Zhanga X., Zhi-hui Zhang, Zhoua X. [14-59].

В современной практике обеспечения устойчивости откосных сооружений при ведении открытых горных работ выделяется, как правило, два основных вида факторов, которые влияют на устойчивость – это природные и техногенные факторы. К первым относятся:

– климатические, включая количество осадков, температурный режим местности, они непосредственно влияют на формирование техногенных водоносных горизонтов в теле отвалов, а также на интенсивность температурного (в том числе морозного) выветривания отложений, находящихся в теле отвала;

– рельеф местности, данный фактор важен в первую очередь для оценки устойчивости именно отвальных насыпей, которые в абсолютном большинстве случаев на сегодняшний день формируются на наклонном основании, в данном случае состояние и поведение отвалов зависит во многом от характеристик пород основания: их прочностных свойств, литологического состава, водоносности и т.д.;

– особенности поверхностного стока (наличие и режим речной сети, озер), которые, во-первых, во многом определяют режим подземных вод, во-вторых, при контакте техногенной насыпи с водными объектами происходит ее дополнительное водонасыщение, что негативно сказывается на устойчивости откосного сооружения; ряд современных исследователей отмечает, что большинство оползневых явлений при ведении открытых горных работ связаны с интенсивным таянием снега, осадками и изменением режима подземных вод и поверхностных водотоков, последние могут разрушать нижний уступ отвала в результате боковой эрозии, что приводит к перераспределению удерживающих и сдвигающих сил в теле насыпи, увеличивая риск проявления негативных горно-геологических процессов в виде оползней или оплывин;

– инженерно-геологические факторы, в первую очередь к ним относятся литологический состав горных пород, уложенных в отвал, условия залегания и характеристики пород естественного основания, физико-механические свойства техногенных отложений: плотность, прочностные характеристики (угол внутреннего трения, сцепление, пределы прочности на одноосное сжатие и сдвиг), важной характеристикой для горных пород является степень выветрелости, которая во многом определяет и обводненность пород и ее физико-механические свойства, для скальных и полускальных пород значимой

характеристикой является трещиноватость (направление, густота, степень раскрытия трещин и др.), кроме того, ключевым фактором является наличие глинистых пород (суглинков и глин) в основании или укладываемой в отвал смеси, как правило, глинистые породы представлены четвертичными отложениями, которые обладают наименьшими прочностными характеристиками, от их количества во многом зависит степень устойчивости техногенной насыпи;

– гидрогеологические факторы, включая параметры залегания водоносных горизонтов, их напорность, гидродинамические характеристики; нужно отметить, что увлажнение значительно влияет на показатели физико-механических свойств глинистых пород, чем более высокая влажность, тем меньше механические характеристики горных пород; рисунок 4 показывает изменение значения угла внутреннего трения от влажности горной породы; кроме того, наличие дополнительного увлажнения определяет набухание, и как следствие, снижение прочности песчано-глинистых отложений, алевролитов и песчаников на глинистом цементе, движение подземных вод определяет наличие гидродинамического давления, которое может вызывать оплывание откосов, сложенных мелкозернистым материалом;

– сейсмические явления, землетрясения оказывают крайне негативное влияние на устойчивость породных отвалов, наличие динамической нагрузки способствует разжижению песчано-глинистых обводненных отложений, увеличению сдвигающих сил в массиве, что в конечном итоге приводит к формированию оползней и других негативных деформационных явлений.

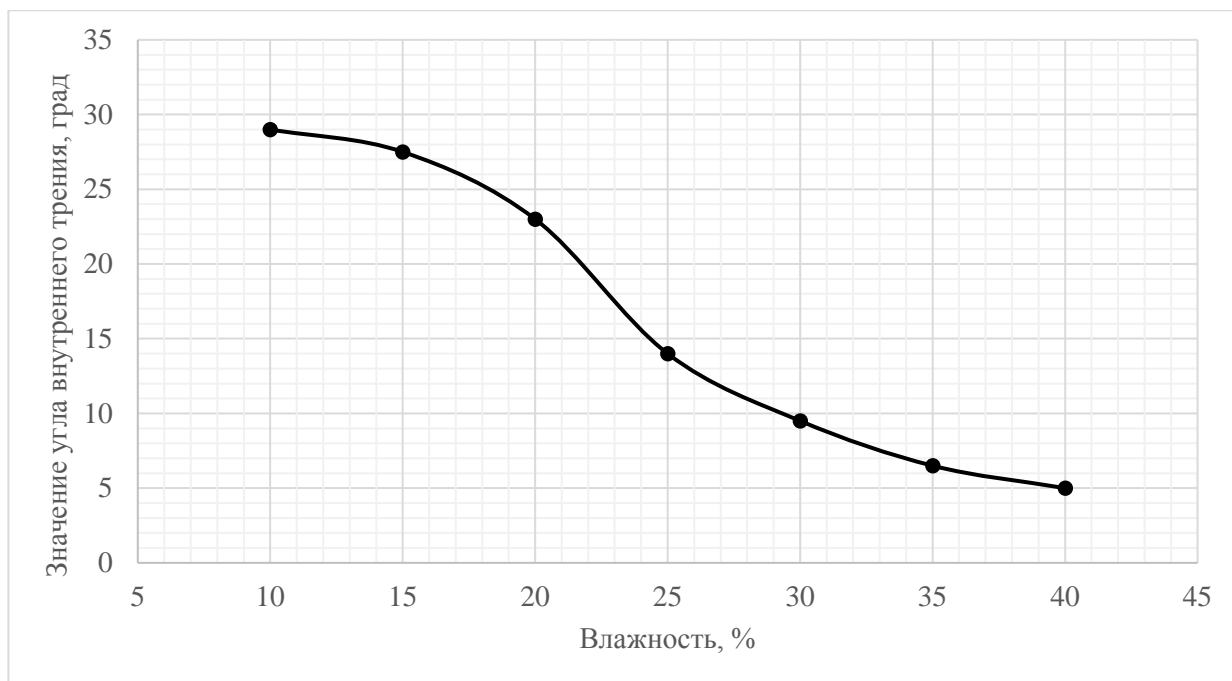


Рисунок 4 – Изменение значения угла внутреннего трения в зависимости от влажности

Природные факторы нужно рассматривать в комплексе для оценки устойчивости откосных сооружений, в том числе отвальных насыпей. Учет только одной группы факторов не позволит достоверно оценить состояние откосного сооружения. При этом нужно отметить, что динамика изменения гидрогеологических параметров максимальна: уровни подземных вод могут варьироваться в широких пределах в достаточно короткие промежутки времени, а прочностные свойства отложений сохраняют свои значения, как правило, в течение длительного периода. Исключением являются глинистые и песчаные отложения, которые при повышении влажности способны быстро снижать прочность или переходить в текучее состояние. Вышеуказанные особенности динамики изменения свойств определяют необходимую периодичность их определения в рамках инженерно-геологического, гидрогеологического, геомеханического и других видов мониторинга, осуществляемого на действующем предприятии.

К основным техногенным факторам, влияющим на устойчивость внешних отвалов, относятся:

– их геометрические параметры: высота всего техногенного сооружения и высота отдельных ярусов, ширина площадок между ярусами, угол наклона яруса к основанию, он, как правило, равен углу естественного откоса отложений, из которых состоит техногенный массив;

– скорость формирования техногенной насыпи, чем интенсивнее ведется отсыпка, тем меньше времени на консолидацию пород (уплотнение под собственным весом), таким образом, внутри отвала могут формироваться слабоуплотнённые участки с низкими прочностными характеристиками, высокой пористостью и водопроницаемостью, что способствует, в том числе, формированию техногенного водоносного горизонта и процессов суффозии;

– наличие динамической нагрузки от движения транспорта, ведения взрывных работ, что определяет аналогичный эффект как от слабого сейсмического явления, при этом стоит отметить, что современные методики не способны в полной мере учитывать динамические и сейсмические нагрузки при оценке состояния откосных сооружений путем расчета коэффициента запаса устойчивости.

Таким образом, можно заключить, что в современном понимании внешний отвал – это сложная система, на состояние которой влияют набор природных и техногенных факторов. В современной практике открытых горных работ отмечается, что оползневые явления происходят, как правило, под влиянием нескольких факторов, негативное проявление которых фиксируется одновременно. При этом стоит отметить, что изменение одного из параметров состояния внешнего отвала однозначно ведет к изменению и других. Выше указывалось влияние гидрогеологических условий на свойства пород, аналогичные связи можно установить и между техногенными или климатическими факторами, и прочностными характеристиками отложений. Учет всех условий, которые влияют на устойчивость откосного сооружения, должен производиться за счет получения комплексной информации при ведении мониторинга и ее систематизации в единой цифровой среде, формирование которой на сегодняшний день возможно с применением принципов

геоинформационного моделирования, которые служат фундаментом для разработки качественного информационного обеспечения проектирования отвалов, управлением их состоянием и планирования горных работ.

#### **1.4 Анализ подходов в практике геоинформационного моделирования отвальных сооружений**

В современной практике геологическое моделирование является инструментарием для создания «цифровых копий» объектов различной природы и структуры. Основными исходными данными для этого процесса являются: геодезическая информация о дневной поверхности рассматриваемой территории, результаты различных видов опробования, в том числе: геохимического, инженерно-геологического, геофизического и т.д. Неотъемлемыми составляющими самого процесса моделирования являются сбор, анализ, верификация, обработка, отображение данных. Значительный вклад в развитие геологического моделирования с применением геоинформационных технологий внесли: Абрамян Г.О., Авдеев А.Б., Агафонов В.В., Беленко В.В., Варыгин С.О., Гончаренко А.Н., Гончаренко С.Н., Горн Е.В., Зайцева Е.В., Куликова Е.Ю., Мельник В.В., Николаев П.В., Оганесян А.С., Перфилов О.В., Стадник Д.А., Стадник Н.М., Татаринов В.Н., Темкин И.О., Федянин О.С., Ческидов В.В., Ютяев А.Е., Ярощук И.В. [64-81]. В современных условиях цифровизации горного производства активно внедряются интеллектуальные геоинформационные системы (ГИС), они интегрируют функциональные модули, реализующие ключевые задачи геологического и маркшейдерского обеспечений горных работ, в ряде случаев диспетчерских служб оперативного управления, систем мониторинга. Ключевое преимущество ГИС-систем – это возможность в режиме близком к реальному времени отслеживать параметры и состояние оборудования, технологических процессов в том числе отвалообразования [82, 83].

В своих работах один из основоположников советской кибернетики А.А. Ляпунов термин «моделирование» определил так: это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная искусственная или естественная система (модель). Она должна находиться в объективном соответствии с познаваем объектом изучения, учитывать основные его свойства и закономерности поведения в различных условиях [84-87].

На современном рынке специализированного программного обеспечения представлено множество платформ, предназначенных для автоматизации решения горно-геологических задач. Данные продукты характеризуются разнообразием архитектуры программы, пользовательских интерфейсов и степени адаптации: отдельные решения ориентированы на узкоспециализированные операции, тогда как другие разрабатываются с учётом нормативно-методических требований конкретных государств или регионов (таблица 1). Несмотря на указанные различия, большинство систем базируется на сходных алгоритмических принципах и логике, методах обработки геологической и технологической информации [88, 89].

Таблица 1 – Анализ функциональности основных горно-геологических информационных систем

Горно-геологическая информационная система	Micromine	Datamine	Геомикс	Mineframe	Leapfrog
Блочное моделирование месторождения и оценка запасов	+	+	+	+	+
Гидрогеологическое моделирование					+
Имплицитное моделирование	+				+
Обработка результатов маркшейдерских измерений	+	+	+	+	

Продолжение Таблицы 1

Проектирование и планирование открытых горных работ	+	+	+	+	
Статистический анализ геологической информации	+	+	+		+
Создание горно-геологической графики	+	+	+	+	+

Функционал современных горно-геологических информационных систем, как правило, включает инструментарий для решения следующих задач:

- создания и управления базами данных;
- обработки, анализа, интерпретации и визуального представления геологических, маркшейдерских, геотехнологических, геофизических и других видов данных;
- трёхмерной визуализации геологических объектов, выработок и т.д.;
- каркасного и блочного моделирования;
- проектирования элементов горнотехнических систем и выработок;
- планирования горных работ на различные временные сроки;
- проектирования буровзрывных процессов;
- формирования технологической документации;
- расчёта укрупнённых технико-экономических показателей.

В рамках настоящего исследования для оценки применимости существующих программных решений к задачам геоинформационного моделирования породных отвалов был выполнен сравнительный анализ функциональных возможностей ведущих ГГИС. Источниками информации послужили официальные ресурсы разработчиков, техническая документация, а также публикации в профильной научно-технической литературе [90].

Результаты сопоставления, представленные в таблице 1, свидетельствуют о значительном единообразии базовых функциональных модулей в

рассматриваемых системах. При этом отдельные платформы обладают специализированными инструментами, ориентированными на специфические потребности целевых пользователей. Существенные различия наблюдаются в качестве реализации алгоритмов, степени автоматизации шаблонных операций, эргономичности интерфейса, производительности при работе с большими массивами данных и возможностях интеграции со сторонними программными комплексами

Результаты проведённого исследования выявили существенный пробел в применении горно-геологических информационных систем для задач геоинформационного моделирования техногенных объектов. Данная проблема обусловлена, прежде всего, преобладанием узкоспециализированных программных продуктов, ориентированных на решение локальных задач: обработки материалов аэрофотосъёмки, расчёта устойчивости откосов, сбора и хранения гидрогеологических наблюдений и так далее. Указанные инструменты, как правило, функционируют в изолированном режиме в рамках отдельных служб или подразделений предприятия, не будучи интегрированными в единую цифровую экосистему предприятия. Дополнительным сдерживающим фактором выступает отсутствие сформированного запроса со стороны недропользователей на создание полноценных трёхмерных геоинформационных моделей отвальных сооружений, что, в свою очередь, тормозит развитие соответствующих функциональных модулей в составе горно-геологических информационных систем [90].

Анализ функционала горно-геологических информационных систем показывает, как возможность использования программ для построения модели откосного сооружения, так и необходимость в применении новейшего программного обеспечения для построения геоинформационных моделей. В связи с тем, что отвалы формируются на больших площадях, их состав и условия формирования весьма неоднородны, высота сооружения и уровень обводнённости различны, что демонстрирует необходимость использования

программного обеспечения, позволяющего автоматизировать расчеты, в том числе за счет использования каркасного и блочного моделирования [90].

Использование ГГИС для построения геоинформационной модели позволит создать единую цифровую систему для планирования всего жизненного цикла горнодобывающего предприятия от экскавации до формирования отвальных сооружений.

Также стоит отметить, что с 2021 года произошел ряд изменений в нормативно-правовых актах Российской Федерации, вступивших в силу в соответствии с Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №439 от 13.11.2020 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Эти правила регламентировали создание и эксплуатацию геомеханической модели месторождения (двух- или трехмерного пространственного представления) [91].

Несмотря на активную цифровизацию горной отрасли, моделирование внешних отвалов на системном уровне остается вопросом слабоизученным, что создает существенный пробел в цифровых данных предприятия. Основное направление работ традиционно сосредоточено на угольных пластах (или рудных телах) и карьерах, в то время как техногенные массивы остаются за рамками детального геологического моделирования. Ситуация усугубляется разрывом между нормативной базой и практическими потребностями: хотя существует ряд ГОСТов, регламентирующих проведение инженерных изысканий и нормативных актов, определяющие параметры отвалов, в контексте создания цифровых моделей эти стандарты практически не применяются, поскольку они заточены под традиционное проектирование и отчетность, но не адаптированы для требований пространственного анализа и геостатистической оценки массивов в специализированных программных средах. При этом функционал современных геоинформационных систем технически позволяет решать задачи такого класса – существует возможность построения геоинформационных моделей отвалов,

применяя принципы блочного моделирования, аналогичные тем, что используются для рудных запасов, однако на практике отсутствует утвержденная методология, описывающая, как корректно оцифровать неоднородное тело отвала с учетом его сложного литологического и гранулометрического состава. Внешние отвалы представляют собой сложные, динамичные и крайне неоднородные объекты: они формируются годами разными способами транспортирования, что приводит к случайному распределению горных пород по площади отвала, и без специализированного подхода объединить эти разрозненные данные в одну непротиворечивую модель попросту невозможно. Для полноценного функционирования модели цифрового предприятия необходимо преодолеть сложившийся подход и включить отвалы в общий информационный контур, поскольку это требуется не только для промышленной и экологической безопасности, но и для эффективного управления всеми этапами производства.

## **1.5 Вывод по главе 1**

Проведённый в первой главе анализ современных методов построения цифровых моделей техногенных массивов позволил сформулировать ряд фундаментальных положений, определяющих научную и практическую основу разработки геоинформационного метода моделирования внешних отвалов угольных карьеров.

Установлено, что породные отвалы угольных месторождений представляют собой сложные инженерно-геологические системы антропогенного происхождения, характеризующиеся высокой степенью пространственно-временной и литологической неоднородностью. Их формирование в условиях Кузнецкого угольного бассейна осуществляется преимущественно «сухим» и гидравлическим способами. Литологический состав отвалов, включающий песчаники, алевролиты, аргиллиты, а также четвертичные суглинки и глины, создаёт предпосылки для формирования зон с

различными прочностными характеристиками, что требует дифференцированного подхода при оценке устойчивости.

Определено, что на устойчивость внешних отвалов оказывает комплексное влияние совокупность природных и техногенных факторов. Среди природных факторов ключевое значение имеют климатические условия, интенсивность атмосферных осадков, особенности рельефа и гидрогеологическая обстановка. Техногенные факторы включают геометрические параметры сооружений, режимы статических и динамических нагрузок, характеристики используемого оборудования и технологию складирования пород. Взаимодействие данных факторов обуславливает динамическую трансформацию физико-механических свойств пород во времени.

Анализ функциональных возможностей современных горно-геологических информационных систем (Micromine, Datamine, ГИС «ГЕОМИКС», Mineframe, Leapfrog) выявил их ориентированность преимущественно на задачи оценки ресурсов и запасов месторождений и планирования горных работ. При этом специализированные модули для геоинформационного моделирования техногенных массивов в данных платформах отсутствуют или имеют ограниченный функционал. Существующие узкоспециализированные программные решения для расчёта устойчивости откосов или обработки гидрогеологических данных, как правило, не интегрированы в единый информационный контур предприятия, что снижает эффективность управления рисками на всех этапах жизненного цикла отвального сооружения.

Выявлено противоречие между требованиями нормативного регулирования, в частности Приказа Ростехнадзора № 439 от 13.11.2020 г., предписывающего создание геомеханических моделей месторождений, и фактическим состоянием цифровизации в области моделирования техногенных объектов. Отсутствие утверждённой методологии оцифровки неоднородных отвальных массивов с учётом их литологического и гранулометрического состава, а также пространственно-временной изменчивости свойств, создаёт

пробел в информационном обеспечении процессов проектирования, эксплуатации и мониторинга внешних отвалов.

Таким образом, результаты анализа, представленного в первой главе, подтверждают актуальность и научную обоснованность разработки подходов и принципов геоинформационного моделирования внешних отвалов угольных разрезов. Предложенный метод должен обеспечивать интеграцию разнородных данных инженерно-геологических, гидрогеологических и маркшейдерских изысканий, построение трёхмерной блочной модели с учётом литологии и времени отсыпки, а также временную коррекцию физико-механических параметров на основе установленных эмпирических зависимостей. Реализация данного подхода создаст основу для повышения промышленной и экологической безопасности эксплуатации отвальных сооружений, оптимизации параметров отвалообразования и обеспечения соответствия требованиям современного нормативного регулирования.

## **2 ПОСТРОЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАРИЯ КАРКАСНОГО И БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **2.1 Оценка применимости принципов блочного и каркасного моделирования для построения геоинформационных моделей внешних отвалов угольных предприятий**

При планировании разработки месторождений твердых полезных ископаемых с целью их рационального использования большое значение имеет комплексная оценка и геометризация не только рудных или пластовых тела, а также проектируемых отвальных сооружений, включая распределение физико-механических параметров в отвальном массиве. Для решения этих задач предлагается использовать моделирование техногенных объектов и оценку прочностных свойств массива на основе программных продуктов (Micromine, SURPAC, DATAMINE, MINEFRAME, ГИС «ГЕОМИКС» и др.). С их помощью предлагается решать задачи не только связанные с отработкой месторождения полезного ископаемого, но и с созданием принципа геоинформационного моделирования отвального сооружения, который служит основой для решения многих задач: выявление ослабленных зон, организации мониторинга, определение интенсивности отсыпки и др. [92].

Современная практика моделирования геологических и геотехнических объектов основывается на исторически сложившемся подходе для построения рудных тел (залежей, пластов) и проектирования карьерных выемок. Горно-геологические информационные системы стали неотъемлемой частью любого горнодобывающего предприятия, и как следствие, использования их для построения блочных и каркасных моделей месторождений. Однако в отношении отвальных сооружений, системный подход к геоинформационному моделированию фактически отсутствует, несмотря на их инженерно-геологическую неоднородность, малоизученность и значительные размеры.

Техногенные массивы, являясь одним из основных сооружений формирующемся на протяжении всего жизненного цикла предприятия, не получают должного внимания в части детальной цифровизации управления ими, что создает существенный пробел в информационном обеспечении ведения отвалообразования и может привести к критическим управленческим решениям.

Первым этапом любого моделирования месторождений можно выделить геометризацию границ полезного ископаемого, подразумевающую оконтуривание минерализованных зон, залежей или пластов. Процесс реализуется последовательно по разведочным линиям или горизонтальным сечениям и основывается на данных, полученных в результате геологического изучения участка недр. Интерпретация структурных элементов и разрывных нарушений выполняется на основе изучения проб, полученных на соответствующих стадиях исследования, при этом основным типом опробования в современной разведке является керновое, стоит отметить, что оно является наиболее достоверным и позволяет учесть тектонические особенности в будущей модели. Информация по опробованию, включая: литологический состав породного массива, содержание полезных компонентов и вредных примесей, а также других свойств и характеристик консолидируется в базе данных. Перед построением любого вида моделей осуществляется проверка данных на ошибки, в современных ГГИС, например, Micromine, существует встроенный инструментарий, который позволяет выявить наиболее грубые, но в то же время часто встречающиеся ошибки, которые в большинстве случаев связаны с некорректным переносом данных с бумажных носителей.

Для понимания пространственной изменчивости рудных тел и вмещающих пород используются методы интерполяции, которые являются объектом изучения отдельной науки – геостатистики. Сегодня существует несколько хорошо зарекомендовавших себя подходов по интерполяции данных, например: метод обратных взвешенных расстояний (IDW), различные модификации кригинга (простой, полииндикаторный, ранговый) и другие. Выбор оптимального алгоритма оценки обуславливается совокупностью факторов,

включая плотность и равномерность разведочной сети, наличие или отсутствие анизотропии изменчивости компонента, морфологию рудных тел и иные геостатистические параметры. Программные средства позволяют не только выполнять расчеты значений компонента в произвольной точке на основе выбранных параметров интерполяции, но и анализировать статистику в пределах области поиска [92].

Стандартной методологией построения цифровых геологических объектов, включая техногенные массивы, является последовательное выполнение ряда операций:

- формирование базы данных скважин;
- выделение интервалов опробования, соответствующих геологическим разностям (рудное тело, пласт, часть отвала, отсыпанная за определенный период и т.д.);
- построение каркасной модели и создание блочной модели с последующей интерполяцией данных;

Таким образом, в контексте оценки блоков полезного ископаемого задача интерполяции сводится к определению неизвестных значений содержаний на основе известных данных разведки, полученных путем опробования скважин или борозд, канав, и т.д. [93].

В рассматриваемой работе основной принцип геолого-технологического моделирования сохраняется, но с учетом специфики исходных данных процесс имеет свои корректировки.

Основными преимуществами блочного моделирования можно выделить:

- визуализация большого объема информации в трехмерном пространстве (рисунок 6);
- многовариантность статистического и геостатистического анализа и оценки качественных показателей (угол внутреннего трения, сцеплений, обводненность и т.д.);
- автоматизация расчетов при обосновании параметров отвалов;

- ведение и использование базы данных инженерно-геологических изысканий для проектирования отвального сооружения;
- широкое распространение вычислительной техники, развитие и ценовая доступность компьютерных технологий [94].

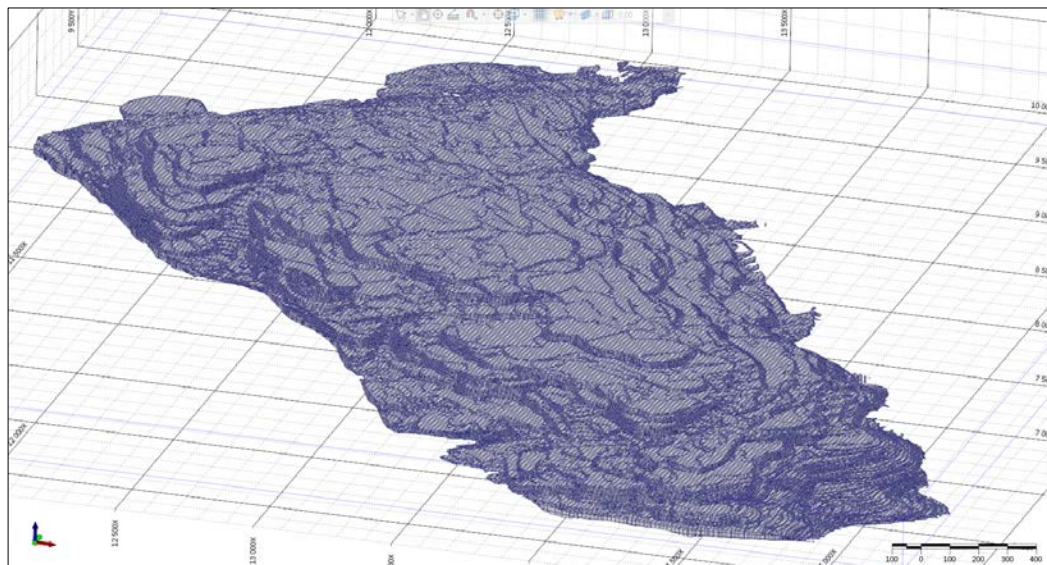


Рисунок 6 – Пустая блочная модель отвального массива

Современное геоинформационное моделирование сталкивается с необходимостью адекватного отображения крайне неоднородной и дискретной по своей природе геологической среды. Причины, по которым использование именно блочного моделирования предпочтительно для построения геоинформационных моделей, многогранны и основаны на его фундаментальных преимуществах. Главным из них является способность достоверно отображать неоднородность и изменчивость геологической среды. Техногенные отложения по своей сути являются неоднородными массивами, их свойства могут меняться на протяжении нескольких метров.

Наконец, блочная модель представляет собой мощный инструмент для визуализации и анализа данных. Трехмерное представление позволяет инженерам и геологам осуществить детализованную визуализацию объектов, выделить зоны с неблагоприятными свойствами, оптимально спроектировать расположение сооружений или трасс. Она служит универсальным языком для

коммуникации между геологами, проектировщиками и горняками, обеспечивая всех участников проекта единой и понятной информационной базой [90, 94].

## **2.2 Анализ инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений каменного угля Кузнецкого бассейна как объекта геоинформационного моделирования**

При ведении открытых горных работ проблема обеспечения устойчивости внешних отвалов является основополагающей. Обусловлено это спецификой складироваемого материала: вскрышные породы в процессе выемки подвергаются интенсивному механическому и взрывному воздействию. В результате формируются техногенные образования, чье структурно-вещественное состояние и физико-механические характеристики принципиально отличаются от свойств ненарушенного массива. Поскольку отвалообразование является важным и затратным этапом технологического цикла угледобычи, факторы, влияющие на стабильность откосов насыпных массивов, требуют детального изучения. В научной литературе исследования в данной области условно разделены по двум ключевым направлениям:

1) технология отвальных работ (Гальперин А.М., Русский И.И., Мельников Н.Н., Винницкий К.Е., Васильев Н.В., Кириченко Ю.В., Нурок Г.А., Пастихин Д.В., Ржевский В.В., Ялтанец И.М. и др.) [54-59];

2) инженерно-геологическое, гидрогеологическое и геомеханическое обеспечение (Бабелло В.А., Бахаева С.П., Гальперин А.М., Жабко А.В., Загоруйко Л.П., Иванов И.П., Кириченко Ю.Н., Крячко О.Ю., Кутепов Ю.И., Кутепов Ю.Ю., Кутепова Н.А., Малюшицкий Ю.Н., Мосейкин В.В., Сергина Е.В., Фисенко Г.Л., Ческидов В.В., Шпаков П.С. и др.) [94-107].

Прочностные характеристики отвальных масс, такие как сцепление и угол внутреннего трения, определяются не только свойствами исходных коренных пород и четвертичных отложений, но и их соотношения в различных пропорциях в процессе складирования. Сводные данные о распределении физико-

механических характеристик техногенных отложений приведены в таблице 2 и визуализированы на рисунке 7.

Таблица 2 – Нормативные параметры механических свойств отвальных пород Кузнецкого угольного бассейна

Типы горных пород и характеристики их смесей		Использованные при испытании нормальные нагрузки, кПа					
		29,4 - 98,1		98,1 - 980,7		980,7 - 2451,7	
		С, кПа	φ, град.	С, кПа	φ, град.	С, кПа	φ, град.
песчаник		10,79	34	10,79	28	12,75	26
алевролит		13,73	32	15,69	29	16,67	27
Смесь песчаник/алевролит	70/30	13,73	33	14,71	29	16,67	27
	50/50	14,71	33	14,71	29	17,65	27
	30/70	14,71	32	15,69	28	18,63	26
Смесь коренные/суглинок	70/30	14,71	33	14,71	28	16,67	25
	60/40	17,65	28	21,58	25	24,52	18
	50/50	21,58	25	26,48	21	27,46	16
	40/60	24,52	22	32,36	17	37,27	13
	20/80	28,44	17	37,27	12	41,19	11
	0/100	29,42	16	39,23	11	46,09	9

Анализ накопленных данных по исследованию процессов отвалообразования, а также действующей нормативно-методической документации позволяет констатировать недостаточность изучения отвалов как объекта научного изучения. Несмотря на их инженерно-геологическую сложность и потенциальную опасность, в большинстве выполненных работ прослеживается недостаточное внимание к методическому обеспечению изучения техногенных отложений и их оснований. Это проявляется в отсутствии специализированных методик определения физико-механических, включая

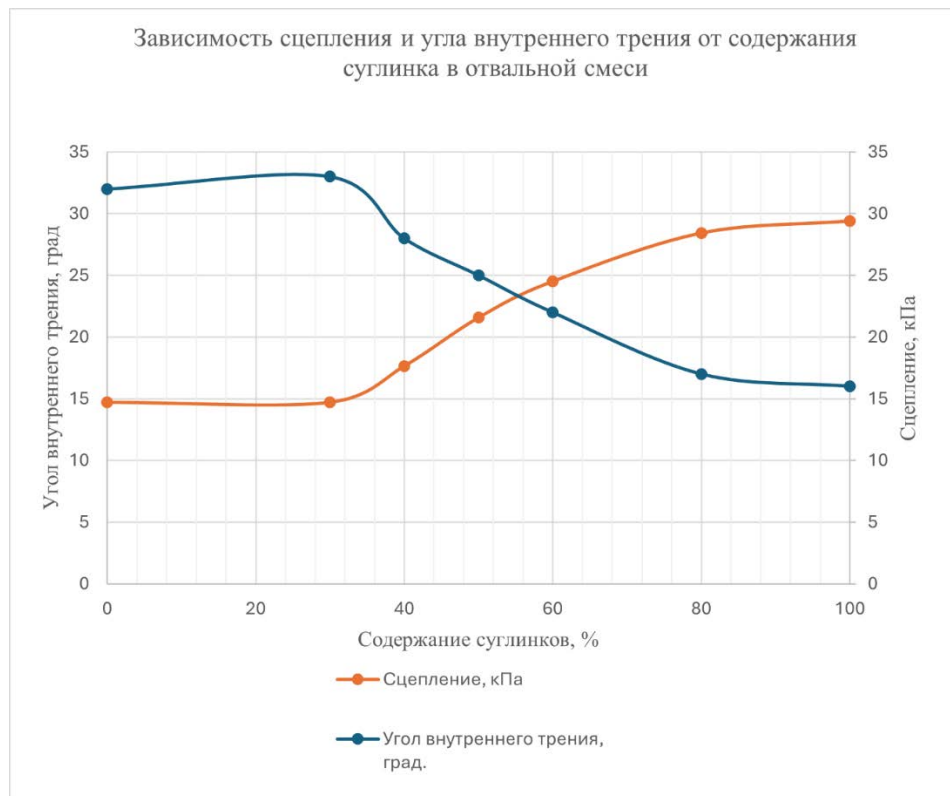


Рисунок 7 – Зависимость сцепления и угла внутреннего трения содержания суглинка в отвальной смеси

водно-физические, прочностные и прочих свойств отвальных масс, комплексных способов сбора и интерпретации первичной информации. В современной практике открытых горных работ до сих пор остаются нередкими случаи, когда свойства пород оснований или самого укладываемого в массив материала принимаются либо по табличным усреднённым значениям или используются характеристики, полученные на других более изученных участках, в лучшем случае близлежащих. В основном данная ситуация складывается в связи с попыткой уменьшить затраты на геологическое изучение. Однако такой подход приводит к значительным рискам на стадии эксплуатации месторождения, особенно при формировании сложных или уникальных природно-технических систем, представленных глубокими карьерами или высокими отвалами [9].

Кроме того, практически отсутствует учет гидрогеологических условий при обосновании проектов формирования отвальных сооружений. В современных нормативно-правовых актах в том числе в Приказе от 13 ноября

2020 г. N 439 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов" нормативные коэффициенты запаса устойчивости для откосов отвалов при детерминированном подходе в сейсмически спокойных районах отсутствует учет гидрогеологических условий, что подразумевает под собой факт того, что тело отвального массива является «сухим» [91]. Также необходимо отметить, что Правилами предусмотрено создание геомеханической модели для месторождения в которую входят и отвальные сооружения: «По результатам инженерно-геологического изучения массива горных пород для объектов с объемом разработки горной массы 1 м<sup>3</sup> и более и при комбинированном способе ведения горных работ составляется геомеханическая модель месторождения (участка недр)», которая должна содержать в себе обширный список входных данных, получаемых при эксплуатации месторождения, но методология построения такой модели отсутствует. [91]

Таким образом, распределение физико-механических свойств в теле отвала и его основании определяется технологией складирования, литологией, климатическими факторами и временем нахождения пород в теле насыпи. Учет этой неоднородности через детальные исследования и мониторинг позволяет использовать данные для геоинформационного моделирования, и как следствие, разрабатывать эффективные меры по стабилизации отвалов, минимизируя риски оползней.

Условия отвалообразования угольных месторождений в значительной степени отличается от рудных месторождений. Основными факторами можно выделить значительный объем складированных вскрышных пород и физико-механические свойства горных пород. В условиях открытой разработки угольных месторождений образуются колоссальные объемы вскрышных пород, размещение которых становится всё более сложной инженерной задачей. Дефицит свободных земельных участков в непосредственной близости от карьеров, сопряженный с экономической необходимостью минимизации

расстояний транспортирования, вынуждает горные предприятия переходить к иным схемам отвалообразования. Данный подход предполагает формирование высоких техногенных сооружений, расположенные на минимальной площади. В свою очередь на рудных месторождениях, как правило, для добычи полезного ископаемого необходимо извлечь гораздо меньший объем вскрышной породы, так как относительно прочные магматические и метаморфические породы позволяют формировать конечный контур отработки с более крутыми углами, нежели чем осадочные породы, представленные на угольных месторождениях. Кроме того, породы, представленные на угольных месторождениях, характеризуются низкими прочностными свойствами и способностью к размоканию [8].

Кузнецкий угольный бассейн, расположенный преимущественно в пределах Кемеровской области, является крупнейшей в России базой коксующихся углей и одним из наиболее значимых угленосных регионов мира. В геоморфологическом плане территория приурочена к межгорной котловине, ограниченной хребтами Кузнецкого Алатау, Горной Шории и структурами Колывань-Томской складчатой зоны. Современный рельеф сформировался в результате взаимодействия тектонических движений и экзогенных процессов денудации и аккумуляции.

Площадь бассейна составляет около 26 700 км<sup>2</sup>, из которых примерно 20 000 км<sup>2</sup> заняты промышленно значимыми угленосными толщами. В структурном отношении Кузбасс представляет собой крупный синклинорий северо-западного простирания. Угленосная толща охватывает интервал от серпуховского яруса нижнекаменноугольного отдела до татарского яруса верхнепермского и подразделяется на балахонскую и кольчугинскую серии, совокупная мощность которых включает до 250 угольных пластов и прослоев общей мощностью до 390 м (рисунок 8).

В рассматриваемом регионе преобладают отложения балахонской и кольчугинской серий (рисунок 9), которые сильно отличаются между собой по

характеристикам вмещающих пород, в первую очередь по типу цемента в алевролитах и песчаниках и прочностным показателям (таблица 3) [8].

Эра-тема	Система	Отдел, млн лет	Ярус, подъярус	-	Серия	Подсерия	Свита, (горизонт)	-	Мощность, м	Цикл угле накопления				
Мезозойская Mz	Юрская J	-	-	-	Тарбаганская J <sub>1-2</sub>	-	Терскокая	J <sub>1-2</sub> tr	-	Тарбаганский бурогольный J <sub>1-2</sub>				
		-	-	-		-	Осиновская	J <sub>1</sub> os	-					
		-	-	-		-	Абашевская	J <sub>1</sub> ab	-					
		-	-	-		-	Распадская	J <sub>1</sub> rs	-					
	Триасовая T	Нижний T <sub>1-2</sub>	Индский	T <sub>1</sub> i	Абинская T <sub>1-2</sub> ab	-	Яминская	T <sub>2</sub> jam	-	Перерыв				
Палеозойская Pz	Верхний палеозой Pz <sub>3</sub>	Пермская P	Татарский P <sub>3</sub> t 265,8	Вятский	P <sub>3</sub> vt	Кольчугинская P <sub>2-3</sub> kl	Ерунаковская P <sub>2-3</sub> er	Тайлуганская	P <sub>3</sub> tl	500-700	Кольчугинский каменно-угольный P <sub>2</sub>			
				Северодвинский	P <sub>3</sub> vd			Грамотеинская	P <sub>3</sub> gr	200-670				
				Уржумский	P <sub>2</sub> ur			Ленинская	P <sub>2-3</sub> ln	600-800				
		Биармийский P <sub>2</sub> b 270,67	Казанский P <sub>2</sub> kz	P <sub>2</sub> kz <sub>1</sub>	Усвятская		P <sub>2</sub> us	150-1300						
					Казанково-Маркинская		P <sub>2</sub> km <sub>2</sub>	400-1000						
					Митинский		P <sub>2</sub> mt		-					
	Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний P <sub>1</sub> Приуральский P <sub>1</sub> p 299,0	Уфимский	P <sub>1</sub> u	Балахонская C <sub>1</sub> -P <sub>1</sub> bl	Верхне-балахонская P <sub>1</sub> bl <sub>2</sub>	Старокузнецкий	P <sub>2</sub> sk	500-1100	Балахонский каменно-угольный C <sub>2</sub> -P <sub>2</sub>			
				Кунгурский	P <sub>1</sub> k			Кемеровская	P <sub>1</sub> kr	40-250				
				Сакмарский	P <sub>1</sub> s			Ишановская	P <sub>1</sub> is	110-250				
		Верхний C <sub>3</sub> 306,5	Средний C <sub>2</sub> 318,1	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Артинский		P <sub>1</sub> ar	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	Острогоская C <sub>1-2</sub> os	Промежуточная		P <sub>1</sub> pr	200-550	
					Ассельский		P <sub>1</sub> a			Нижне-балахонская C <sub>2-3</sub> bl <sub>1</sub>		Алыкаевская	C <sub>3</sub> al	100-550
					Гжельский		C <sub>3</sub> g					Мазуровская	C <sub>2</sub> mz	100-450
		Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Московский		C <sub>2</sub> m	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	Острогоская C <sub>1-2</sub> os	Каезовский		C <sub>2</sub> kz	200-600	Перерыв
					Башкирский		C <sub>2</sub> b			Евсеевский		C <sub>1</sub> ev		
					Серпуховский		C <sub>1</sub> s			Верхотомский		C <sub>1</sub> vt		
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>	Камеиугольная C	Нижний C <sub>1</sub> 359,2	Визейский	C <sub>1</sub> v-s	Мозжухинская C <sub>1</sub> v	-	-	-	-	-				
			Турнейский	C <sub>1</sub> t	-	-	-	-	-	-	-			
Средний Pz <sub>2</sub>														



Иная картина наблюдается у пород кольчугинской серии (разрезы «Новоказанский», «Талдинский», «Моховский», «Таежный» и т.д.). Эти отложения прошли менее глубокие стадии катагенеза, поэтому вторичные изменения в них выражены слабее. Для них характерен глинистый цемент (преимущественно гидромусковит с примесями серицита и карбонатов), имеющий плёночную структуру. Такие породы более чувствительны к увлажнению и быстрее теряют прочностные характеристики подвергаясь процессам выветривания.

Как итог, отложения, относящиеся к балахонской и кольчугинской серии, существенно различающиеся по типу цементации и исходным прочностным характеристикам, демонстрируют разное поведение на всех этапах технологического цикла: от выемки и транспортировки до формирования техногенного массива. Это различие необходимо учитывать при проектировании отвалов и оценке их долгосрочной устойчивости [8].

Таблица 3 – Характеристика вскрышных пород кольчугинской и балахонской серий

Виды пород	Породы кольчугинской серии (Центральный Кузбасс)	Породы балахонской серии (предгорные районы Кузбасса)
Песчаники	Цемент пород в основном глинистый, пленочный, представлен гидрослюдой. Среднее значение временного сопротивления сжатию 37 МПа. Содержание во вскрышной толще достигает 25 %.	Цемент пород преимущественно карбонатный, поровый и пленочный. Среднее значение временного сопротивления сжатию 87 МПа. Содержание во вскрышной толще достигает 60 %.
Алевролиты	Цемент преимущественно глинистый, пленочного типа. Среднее значение временного сопротивления сжатию 26,2 МПа. Содержание в отвале составляет до 70%.	Характеризуются наличием карбонатного цемента. Среднее значение временного сопротивления сжатию 60,67 МПа. Составляют до 30% отвальной массы.

Продолжение Таблицы 3

Виды пород	Породы кольчугинской серии (Центральный Кузбасс)	Породы балахонской серии (предгорные районы Кузбасса)
Аргиллиты	Характеризуются ослабленными структурными связями. Среднее значение временного сопротивления сжатию 19,7 МПа. Содержание в отвальной массе незначительно – до 5 %.	Характеризуются ослабленными структурными связями. Среднее значение временного сопротивления сжатию 22,3 МПа. Содержание в отвальной массе незначительно – до 5%.

### **2.3 Особенности строения Талдинского каменноугольного месторождения и технологии формирования внешних отвалов при его отработке**

В рамках настоящего диссертационного исследования для апробации разработанных подходов был выбран внешний отвал «Восточный», расположенный в центральной части Ерунаковского геолого-экономического района Кузнецкого угольного бассейна. Пространственные параметры Талдинского каменноугольного месторождения характеризуются максимальной протяженностью по простиранию до 14 км и шириной до 12 км, при общей площади около 77,5 км<sup>2</sup> (рисунок 10) [109].

Климатические условия района исследований относятся к типу резко континентального, что обусловлено географическим положением территории. В зимний период регион находится под влиянием сибирского антициклона –

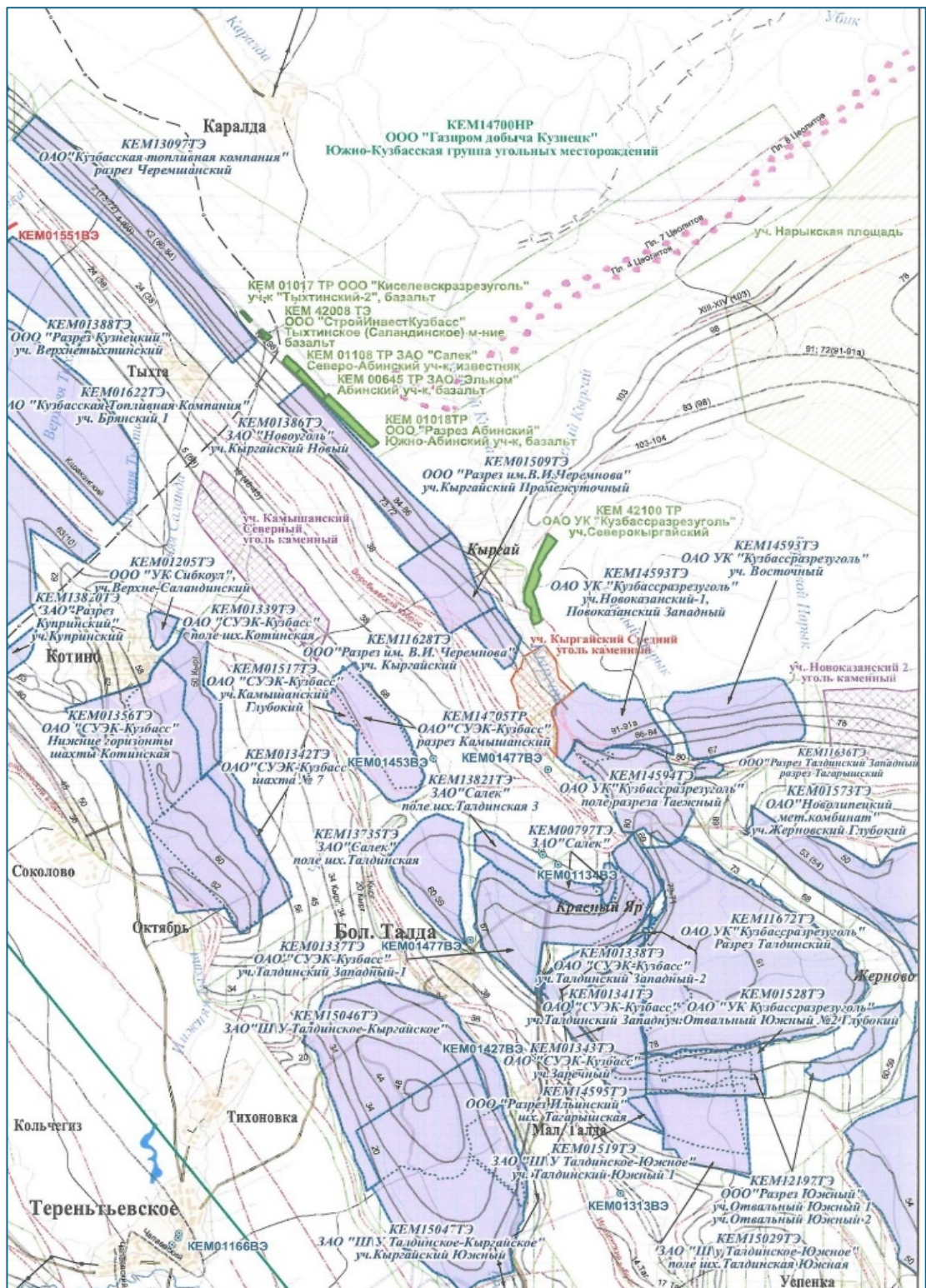


Рисунок 10 – Территориальное расположение Талдинского каменноугольного месторождения

области повышенного атмосферного давления, тогда как летом преобладает область пониженного давления. Такая специфика определяет господство

континентальных воздушных масс в течение всего года, формируя значительные сезонные амплитуды температур. Согласно многолетним данным метеонаблюдений (АМСГ Новокузнецк, ГП Красулино, Усково, Западный), среднегодовая температура воздуха составляет +1,5 °С. Наиболее тёплым месяцем является июль со средней температурой +18,8 °С (абсолютный максимум +38,0 °С), наиболее холодным – январь со средней температурой –16 °С (абсолютный минимум –52,0 °С). Атмосферные осадки выпадают в виде дождя, снега или имеют смешанный характер. Среднемноголетняя сумма осадков составляет 722 мм, при этом их месячное распределение неравномерно: от 34,6 мм в марте до 80,4 мм в августе [109].

Характеристика снежного покрова отличается высокой пространственной изменчивостью, зависящей от рельефа и розы ветров. В ложбинах и понижениях рельефа мощность снега может достигать трёх метров, тогда как на открытых склонах он практически не удерживается.

Отвал «Восточный» расположен в северо-восточном направлении от границ разреза и в настоящее время формируется по автомобильно-бульдозерной технологической схеме (рисунок 11). На начальных этапах эксплуатации данное горнотехническое сооружение создавалось в рамках циклично-поточной технологии с использованием отвалообразователей. По состоянию на конец 2024 года абсолютные отметки дневной поверхности техногенного массива варьируются в диапазоне от +250 до +430 м [12].

Существенные осложнения при формировании отвального сооружения «Восточный» обусловлены морфологией основания, характеризующегося наличием выраженных уклонов и развитой сети логовых систем, сосредоточенных преимущественно в северо-западной части проекта. Производственный опыт предприятия свидетельствует о повышенной склонности к деформированию участков, отсыпаемых в пределах ложбин,

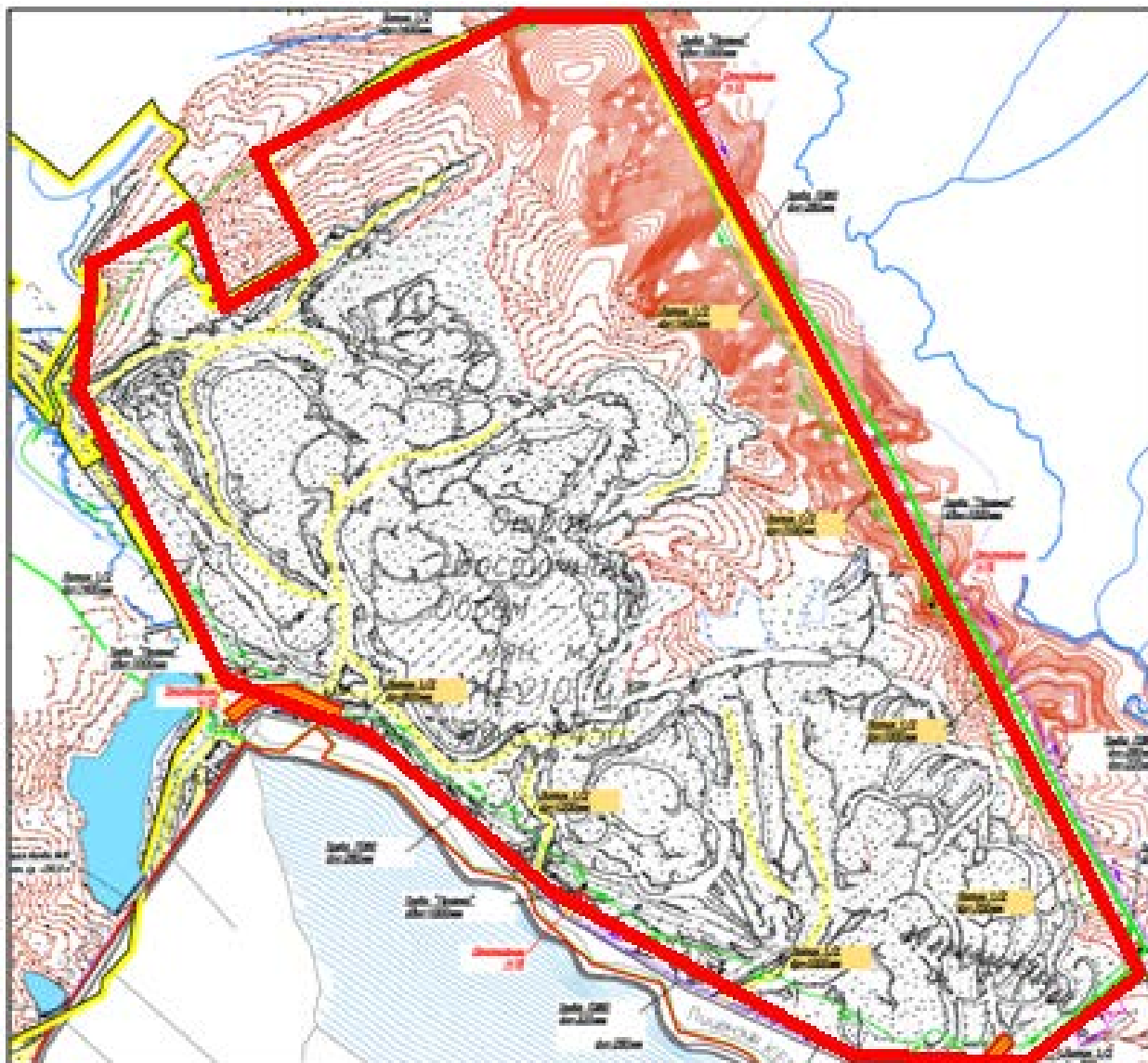


Рисунок 11 – Современное состояние отвала Восточный (красным цветом показаны границы проектируемого сооружения)

причем наиболее критичными зонами выступают тальвеги логов. Анализ сезонности проявления негативных геодинамических процессов показывает, что максимальная активность приходится на переходные периоды года: на весенне-осенний сезон зарегистрировано 55% случаев нарушений устойчивости, тогда как доля летнего и зимнего периодов составляет 30% и 15% соответственно.

Кайнозойские отложения, образованные рыхлыми образованиями, формируют сплошной чехол, покрывающий палеозойские отложения, присутствующие на участках и месторождениях. Мощность рыхлых отложений

изменяется в пределах от 0,2 до 10,0 метров в долинах рек и оврагах, и достигает 40 метров на водоразделах. Наибольшей мощностью, в пределах рассматриваемого участка, рыхлые отложения обладали на площади распространения пласта 91 (до 40 метров), обладающие характерными физико-механическими свойствами, представленными в таблице 4.

Таблица 4 – Физико-механические свойства рыхлых пород

Показатель, единица измерения	Суглинки	Глины
Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	<u>2 670 -2 790</u> 2 740	<u>2 700 -2 790</u> 2 740
Объемный вес влажной породы, кг/м <sup>3</sup>	<u>1 720-2 010</u> 1 940	<u>1 92-2 160</u> 2 000
Степень водонасыщенности	<u>0,78-0,97</u> 0,90	<u>0,83-1,00</u> 0,91
Число пластичности, %	16,1	19,5
Коэффициент уплотнения	<u>0,06-1,20</u> 0,48	<u>0,48-1,40</u> 0,76
Коэффициент фильтрации, м/сут	<u>0,000-0,002</u> 0,0011	<u>0,000-0,003</u> 0,0008
Угол внутреннего трения, градус	22 <sup>0</sup>	22 <sup>0</sup>
Сцепление, МПа	<u>0,008-0,176</u> 0,092	<u>0,0075-0,219</u> 0,113

Угленосная толща в границах лицензии рассматриваемого участка недр сложена осадками грамотеинской и тайлуганской свит кольчугинской серии верхней перми. Количественная характеристика литологического состава тайлуганской и грамотеинской свит представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Количественная характеристика литологического состава отложений (по сумме двух свит)

Разведочная линия	Песчаники		Переслаивание		Алевролит крупный		Алевролит мелкий		Аргиллит (углистый)		Уголь		Максимальная суммарная мощность свит, м
	м	%	м	%	м	%	м	%	м	%	м	%	
Сев.4 р.л.	119	25	4	1	84	18	175	37	13	3	73	16	468
4 р.л.	143	30	20	4	44	9	184	38	13	3	75	16	479
6 р.л.	120	22	12	2	21	4	286	52	24	4	90	16	553
7 р.л.	81	19	13	3	41	10	205	47	22	5	68	16	430
Юж.7 р.л.	86	22	8	2	36	9	168	44	21	5	66	17	385
Среднее	110	24	11	2	45	10	204	44	19	4	74	16	463

Пермские коренные породы включают алевролиты, песчаники (преимущественно крупнозернистые на кремнисто-карбонатном и глинисто-гидрослюдистом цементе, минеральный состав зерен: кварц, полевые шпаты, карбонаты), аргиллиты и каменный уголь. Алевролиты встречаются от крупнозернистых до мелкозернистых, имея характерную угловатую форму обломков. Осадки грамотеинской и тайлуганской свит перекрываются рыхлыми мел-палеоген-неоген-четвертичными отложениями.

Анализ результатов геологоразведочных работ показал значительное влияние на физико-механических свойства вскрышных пород степени их выветривания. У песчаников, алевролитов и аргиллитов по мере приближений к границе с рыхлыми отложениями (в зоне выветривания) снижаются показатели плотности и увеличиваются значения пористости. Прочность вскрышных пород напрямую зависит от состава их цемента. Карбонатный цемент обеспечивает наибольшую устойчивость пород, в свою очередь, глинистый – минимальную. При этом в результате эксплуатационных данных значения прочностных свойств вскрышных пород свидетельствуют о более высоких значениях в сравнении с

геологоразведочными данными. Особо прочными характеристиками по данным геологического отчета выделяются минерализованные алевролиты. Сводные показатели физико-механических свойств пород с нарушенной структурой Талдинского каменноугольного месторождения представлены в таблице 6 [109].

Таблица 6 – Физико-механические свойства неветрелых пород в массиве

Показатель, единица измерения	Песчаники	Алевролиты	Аргиллиты
Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	2 680	2 650	2 640
Объемный вес влажной породы, кг/м <sup>3</sup>	2 280	2 320	2 110
Объемный вес скелета, кг/м <sup>3</sup>	2 190	2 230	1 850
Естественная влажность, %	4,31	4,88	14,08
Пористость, %	16,9	17,59	29,91
Коэффициент пористости, д.е.	0,209	0,210	0,448
Степень влажности, д.е.	0,511	0,65	0,83
Временное сопротивление сжатию, МПа	16,90	10,31	-
Временное сопротивление растяжению, МПа	0,0189	0,0165	-
Коэффициент внутреннего трения	0,975	0,900	0,453
Угол внутреннего трения, градус	44	42	24
Сцепление, МПа	0,313	0,178	-
Сцепление с учетом коэффициента внутреннего ослабления, МПа	0,094	0,053	0,033

В зависимости от степени выветрелости и трещиноватости, породы пермского возраста разделяются на затронутые и незатронутые выветриванием (рисунок 12). В условиях рассматриваемого района выветриванию подвержены полускальные породы, залегающие до глубины 50-60 м. Инженерно-геологические свойства этих двух групп горных пород существенно различаются. Плотность пород в зоне выветривания значительно ниже, а влажность выше, чем у неветрелых разностей. Сцепление пород зоны выветривания в 3-4 раза меньше, значения углов внутреннего трения практически не отличаются, кроме аргиллитов, для данных пород зоны

выветривания последний показатель на  $14^0$  меньше, чем у аналогичных пород, не подвергшихся нарушению структуры (таблица 7) [109]. В результате ведения добычных работ физико-механические свойства не затронутых выветриванием породы будут существенно меняться.

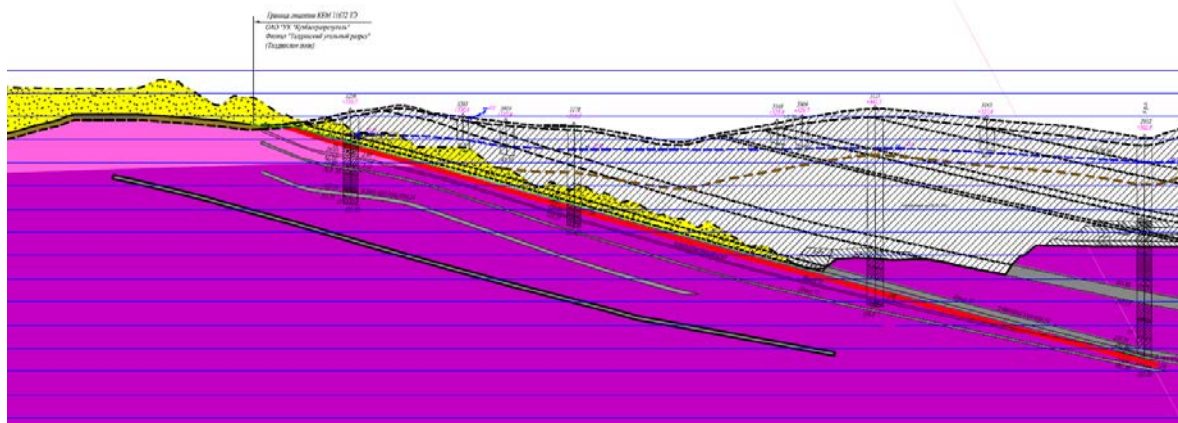


Рисунок 12 – Геологический разрез с указанием зон пород с нарушенной (светло-сиреневый цвет) и ненарушенной (темно-сиреневый цвет) структурой, а также навалов (желтым цвет), представленные смесью коренных горных пород

Таблица 7 – Физико-механические свойства пород с нарушенной структурой

Типы пород	Объемный вес с нарушенной структурой, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент разрыхления	Коэффициент внутреннего трения	Угол внутреннего трения, град.	Сцепление, МПа
Суглинки	1 930	1,04	0,336	19	0,0169
Глины	1 750	1,13	0,324	18	0,0181
Песчаники выветрелые	1 530	1,50	0,648	33	0,0230
Песчаники неветрелые	1 590	1,50	0,682	34	0,0147
Алевриты выветрелые	1 500	1,55	0,588	30	0,0122
Алевриты неветрелые	1 670	1,48	0,615	31	0,0103
Аргиллиты выветрелые	1 410	1,48	0,470	25	0,0137
Аргиллиты неветрелые	1 510	1,58	0,623	32	0,0134

Проведенный анализ отвала «Восточный» Талдинского каменноугольного месторождения, расположенного в горно-геологических условиях Кузбасса, показал, что формирование техногенного массива осуществляется на наклонном рельефе, осложненном логовыми системами, что исторически обуславливало повышенный риск деформаций отсыпаемых пород, особенно в весенне-осенний периоды. Геологическое строение рассматриваемой в рамках диссертационного исследования площади представлено кайнозойскими рыхлыми отложениями и пермскими коренными породами, физико-механические свойства которых существенно изменяются в зависимости от литологического состава, степени выветрелости и нарушенности структуры.

#### **2.4 Создание структурных геоинформационных моделей отвалов, сформированных в результате добычи каменного угля**

Построение геоинформационной модели внешних отвалов является задачей, в которой необходимо с одной стороны учитывать аспекты геологической среды (пространственную неоднородность, структуру объектов, особенности инженерно-геологических и гидрогеологических условий), а с другой стороны методически обосновать применение тех или иных способов интерполяции данных, создания каркасных и блочных моделей, а также анализа, интерпретации и визуализации данных. При этом нужно отметить, что в последнее десятилетие значительно ускорился процесс развития технологий, реализованных в горно-геологических информационных системах, в частности появляются новые инструменты как для оконтуривания и интерпретации данных, так и для глубокого анализа исходной геологической информации, включая выявление сложных зависимостей между различными параметрами. Кроме того, в последние годы широкое развитие получили методы машинного обучения, которые позволяют строить сложные математические прогнозные модели на основе принципов предиктивной аналитики. Перечисленные аспекты

формируют методическое обеспечение, а также непосредственный инструментарий для разработки геоинформационных моделей различных объектов горного производства, включая внешние отвалы [110].

Ниже рассмотрен принцип «этапности» для построения модели внешнего отвала в горно-геологической информационной системе. По аналогии с алгоритмом моделирования рудных месторождений на первой стадии должна быть создана база данных скважин, в данном случае инженерно-геологических (рисунок 12). Для рассматриваемого объекта было осуществлено выделение интервалов опробования по данным инженерных изысканий (ИГИ) на осях скважин на основе паспортов пройденных выработок, а также данные результатов лабораторных исследований.

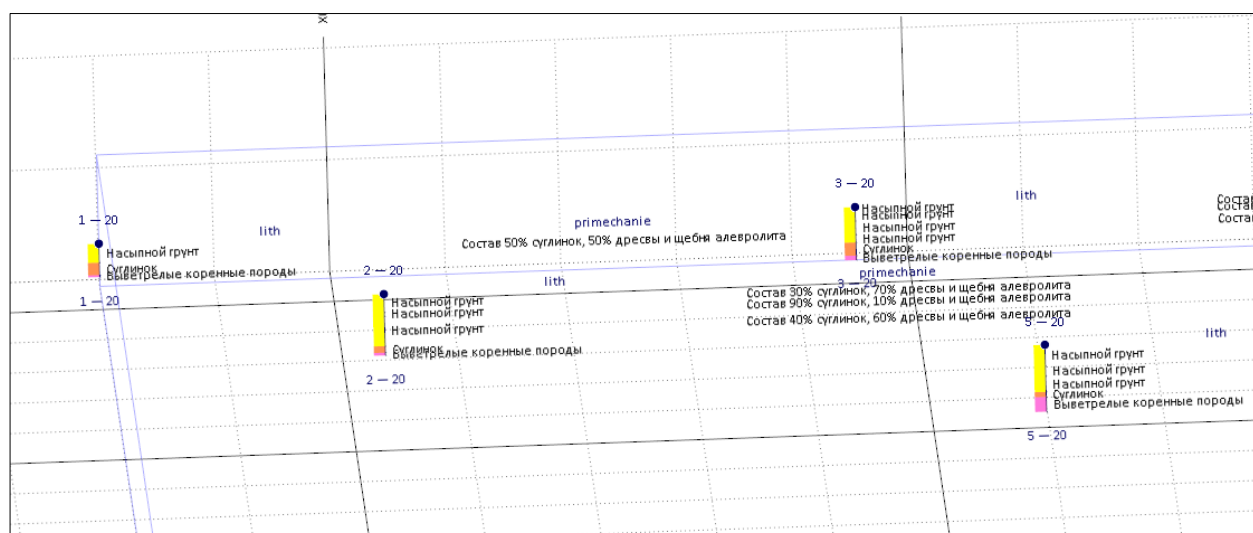


Рисунок 12 – Визуализированная инженерно-геологических скважин в трехмерном пространстве

На втором этапе были визуализированы данные бороздowego опробования, полученные в результате обработки протоколов лабораторных испытаний показатели сцепления и угла внутреннего трения, одновременно осуществлена привязка отобранных проб по годам отсыпки (рисунок 13).

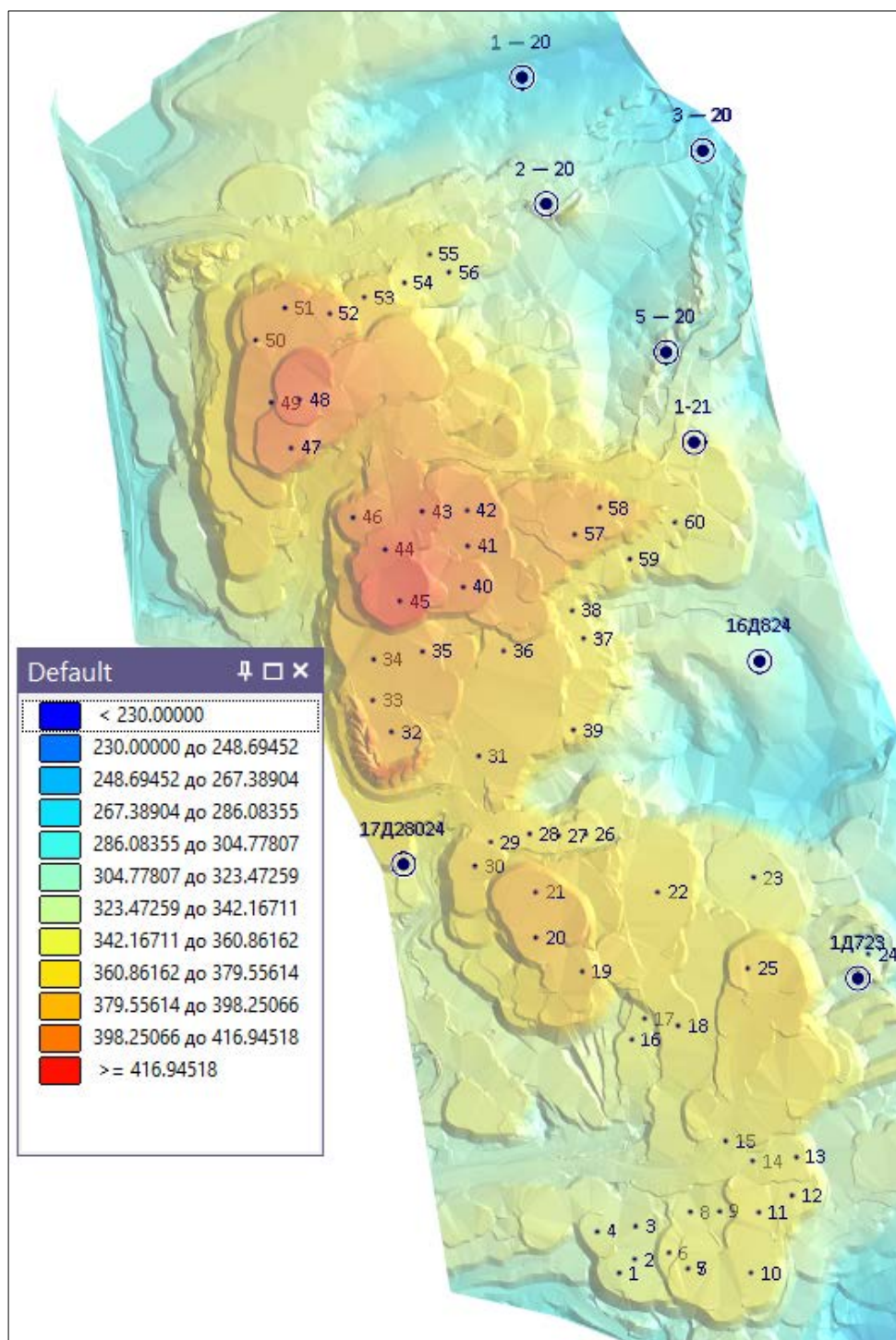
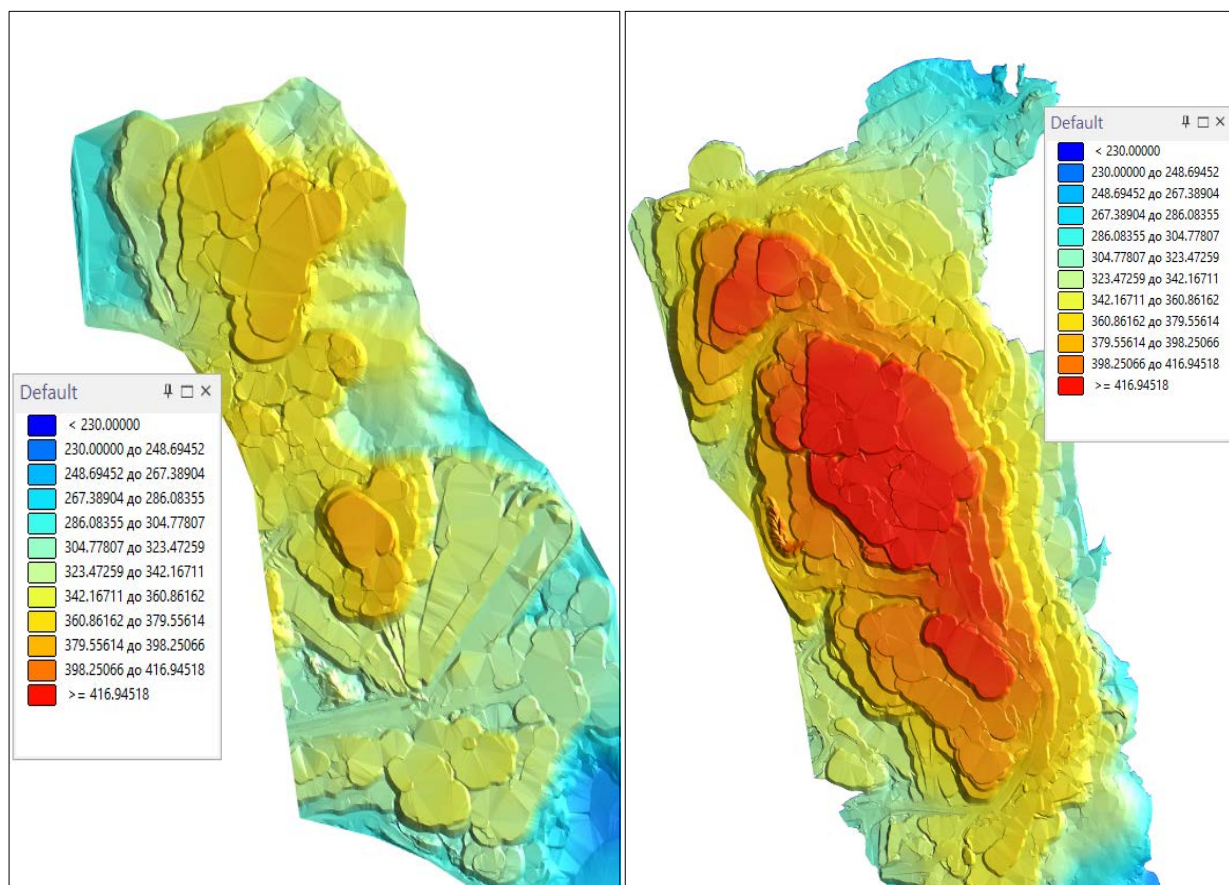


Рисунок 13 – Визуализированные положения точек бороздового опробования на отвале «Восточный»

На третьем этапе выполнено моделирование каркаса поверхностей на основании данных топографической съемки. В результате оконтуривания получена оболочка, которая отображает топографическую поверхность района с привязкой к местной системе координат (рисунок 14).



а)

б)

Рисунок 14 – Каркасы построенные по годам отсыпки:

а) положение отвала на 2010г., б) положение отвала на конец 2024г

Четвертый этап – построение замкнутых солидов отсыпки отвальной массы по годам (рисунок 15). При построении возникает сложность, так как после построения цифровых моделей поверхностей некоторые каркасы в зоне, где отвалообразование не производилось, накладываются друг друга, вызывая ошибку пересечения треугольников, это чаще всего связано с погрешностями исходных аэрофотограмметрических материалов. На этом этапе необходимо вручную искать зоны пересечения и исключать их путем использования булевых операций, которые встроены почти во все современные горно-геологические информационные системы.

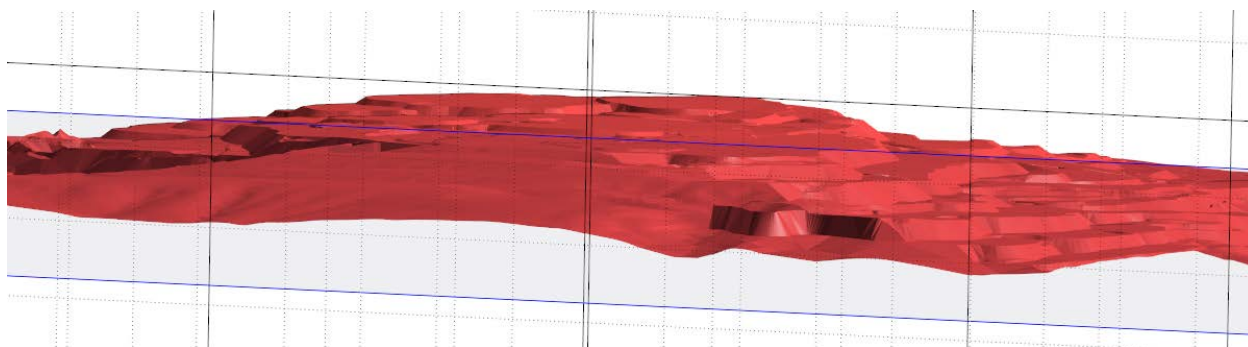


Рисунок 15 – Визуализированный замкнутый каркас отсыпки по годам формирования отвала

Пятый этап – выбор значения размеров материнского блока, который осуществляется на основе анализа технологических паспортов отвалообразования (рисунок 16), принятых на предприятии. Так как в соответствии с технологической схемой высота отсыпки принята 30 м, материнский блок был принят размером 15x15x15 м с субблокированием до 5x5x5 м, это позволяет исключить значительные погрешности в построении формы рассматриваемого объекта с одной стороны и минимизировать количество элементарных единиц модели с другой.

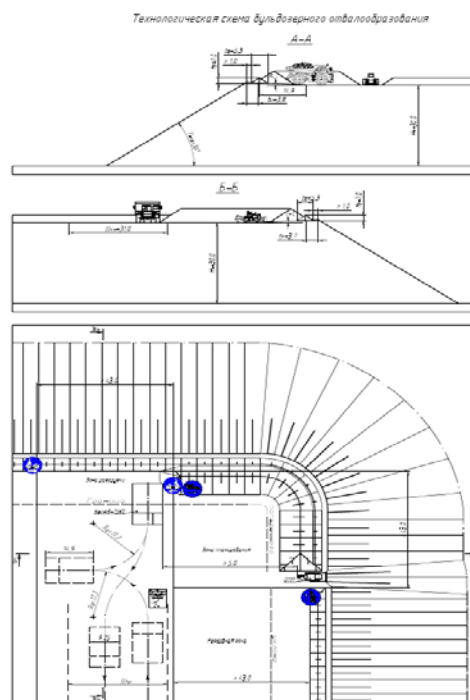
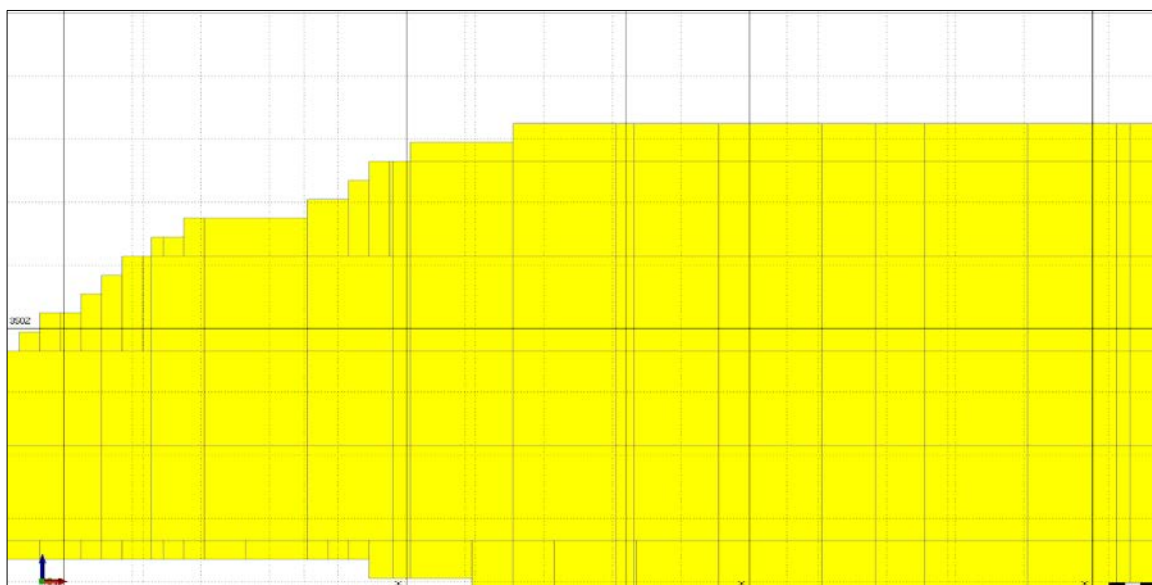
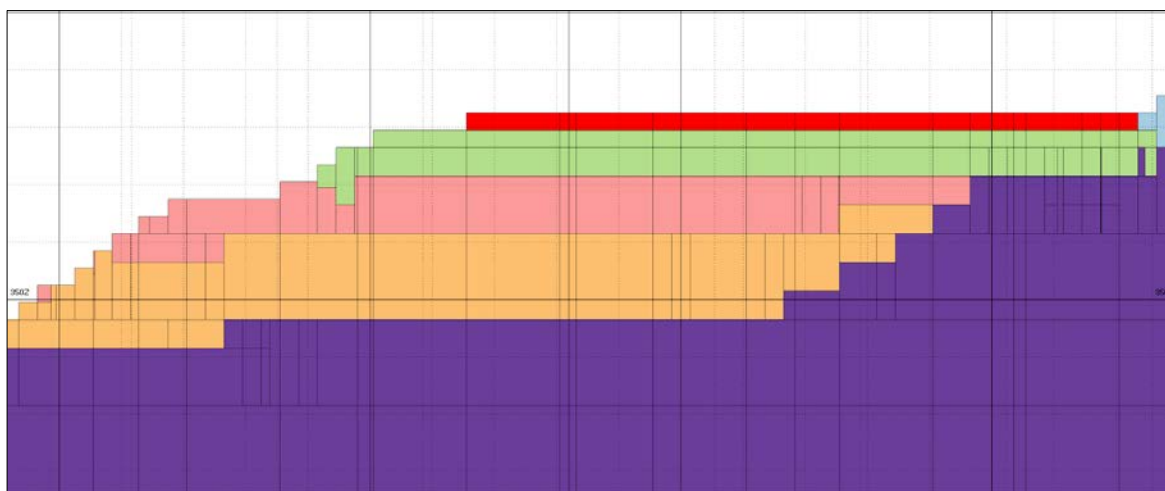


Рисунок 16 – Выкопировка из паспорта отвалообразования

На шестом этапе использован принцип «дискретности» для построения пустой блочной модели, для каждого года отсыпки (рисунок 17 а). Данный этап подразумевает разделения блока по границам отсыпки различных годов по оси  $Z$  и заполнения каждого элемента модели атрибутом, соответствующий его году (рисунок 17 б).



а)



б)

Рисунок 17 – Сечение по отвалу «Восточный»: а – изначально построенная пустая блочная модель, б - уточненная модель с помощью метода субблокирования.

Для повышения достоверности использовался метод субблокирования. Это функция, применяемая для повышения точности моделирования контактов между различными геологическими телами внутри блока (например, руды и вмещающих пород или части отвала, имеющие различные свойства и характеристики отложений). Стандартная регулярная сетка блоков (родительских блоков) часто имеет грубые границы, которые неточно отображают сложную форму объекта, в нашем случае границы, части отвала, сформированного в определенный временной период.

Субблокирование в методе геоинформационного моделирования решает эту проблему путем дробления родительских блоков, которые пересекаются с границей отсыпки по годам, на более мелкие блоки, называемые субблоками. Процесс работает следующим образом. Сначала была построена оболочка отвала на текущий год. Затем для каждого родительского блока, который пересекается с этой оболочкой, выполняется проверка. Если блок находится полностью внутри оболочки, он остается целым и считается принадлежащим этому году. Если блок находится полностью снаружи, он на данном этапе не рассматривается. Если же блок пересекается границей оболочки, он делится на несколько более мелких субблоков по заданному пользователем коэффициенту субблокирования.

После дробления для каждого субблока определяется его положение относительно оболочки. Субблоки, оказавшиеся внутри оболочки, сохраняются и получают значение присвоенного индекса соответствующего года, субблоки снаружи будут анализироваться на следующих этапах построения модели, при рассмотрении части техногенного массива, отсыпанной в следующий временной интервал. В результате границы отсыпки по годам становятся более достоверными и точным, так как они аппроксимируются множеством мелких субблоков, а не крупными родительскими блоками. Этот метод показывает высокую достоверность, но увеличивает значительно количество блоков в модели и вычислительную нагрузку на компьютерную технику, в связи с чем коэффициент величины субблокирования необходимо подбирать, опираясь не

только на достоверность, но и на размер блочной модели. Полученная цифровая блочная модель по годам отсыпки представлена на рисунке 18.

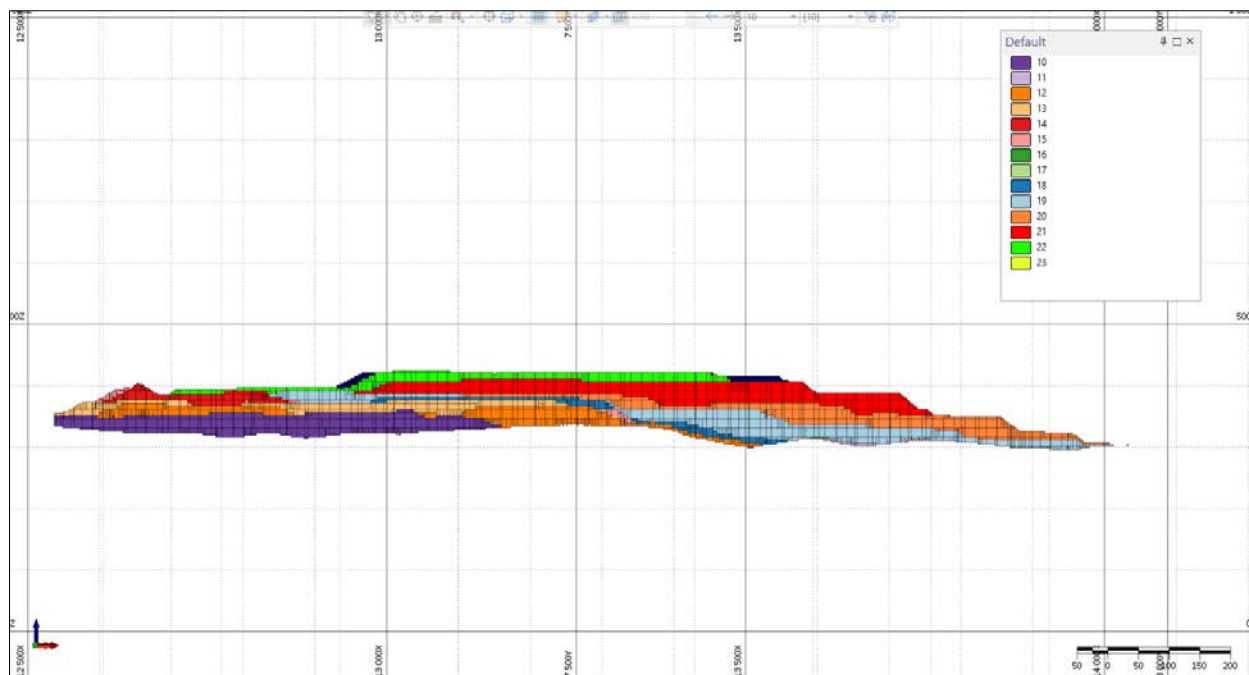


Рисунок 18 – Сечение геоинформационной модели отвала «Восточный», с идентификацией блоков по годам отсыпки

Таким образом метод построения геоинформационных блочных моделей в целом повторяет этапность обычного подхода при моделировании месторождений твердых полезных ископаемых за исключением особенностей в части отсутствия геологоразведочной сети и построения контура «рудного тела», вместо этого применяются топографические съемки, принципы «этапности» и «дискретности»

## 2.5 Выводы по главе 2

В рамках второй главы диссертационного исследования был проведен комплексный анализ применимости принципов каркасного и блочного моделирования для построения геоинформационных моделей внешних отвалов угольных предприятий, а также детально изучены инженерно-геологические условия Кузнецкого бассейна на примере Талдинского месторождения.

Установлено, что, несмотря на устоявшуюся практику использования блочного моделирования преимущественно для оценки рудных тел, данный методологический аппарат обладает высоким адаптивным потенциалом для геометризации и оценки физико-механических свойств техногенных массивов. Ключевым отличием предложенного подхода при оконтуривании является замена традиционной геологоразведочной сети на данные периодических топографических съемок и инженерно-геологических изысканий, что позволяет формировать модель отвала с привязкой прочностных характеристик к временным интервалам отсыпки. Разработанный алгоритм, включающий создание базы данных скважин, построение топографических каркасов, формирование замкнутых массивов по годам и применение методов работы с блочными моделями, обеспечивает высокую точность аппроксимации границ отсыпаемых масс и позволяет осуществить организацию изучения и мониторинга с учетом влияния временных данных [111].

Проведенный анализ инженерно-геологических условий Кузнецкого бассейна позволил выявить существенное различие прочностных характеристик вскрышных пород. Основным фактором, влияющим на прочностные свойства, коренных пород является тип цементации. В условиях Талдинского каменноугольного месторождения преобладают отложения кольчугинской серии с высоким содержанием глинистого цемента, который обуславливает высокую склонность пород к выветриванию и размоканию. Значительная изменчивость физико-механических свойств пород обосновывает необходимость использования при моделировании отвальных сооружений геоинформационные модели.

Полученная геоинформационная блочная модель предоставляет качественную основу для решения задач геомеханического мониторинга, выявления ослабленных зон и оптимизации параметров отвалообразования в рамках предприятия. Интеграция принципов блочного моделирования с данными инженерно-геологических изысканий и топографических съемок создает основу, а именно, принцип «комплексности» для перехода от формального нормативного

подхода к управлению устойчивостью отвалов к научно обоснованному прогнозному моделированию, что особенно актуально в условиях планируемого увеличения объемов отсыпки и усложнения горно-геологических условий отработки месторождений Кузбасса.

### **3 ИНТЕГРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОТЛОЖЕНИЙ ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННУЮ МОДЕЛЬ**

#### **3.1 Анализ показателей физико-механических свойств отложений в теле отвала угольных месторождений внешних отвалов**

Параметры физико-механических свойств пород отвалов определялись ранее ООО «НПФ «Карбон» в работе «Изучение физико-механических свойств техногенных пород для условий отвалов сухих пород филиала «Талдинский угольный разрез» [112]. Реализованные исследования включали проведение лабораторных испытаний образцов отвальных отложений с целью определения прочностных свойств, включая сцепление, угол внутреннего трения. Данные исследования были произведены как отдельно для скальных углевмещающих (коренных) пород, поступающих в отвалы разреза, так и суглинистых четвертичных отложений, а также при их сочетаниях в различных процентных соотношениях.

Анализ полученных результатов показал, что при содержании суглинистого материала в образце менее 30 % прочностные свойства данного материала близки по значениям свойств исходных полускальных пород или их смесей. При увеличении количества глинистой составляющей в образцах отмечается рост показателей сцепления с одновременным уменьшением значений угла внутреннего трения. Так как рост сцепления незначительный, то в целом можно заключить, что общее сопротивление сдвигу отложений уменьшается, что в конечном итоге снижает показатели их устойчивости. При содержании суглинков в составе смеси более 70%, ее характеристики становятся практически такими же, как у природных четвертичных суглинков, залегающих на площади рассматриваемого месторождения [112].

В ноябре-декабре 2020 года для организации контроля состояния оползнеопасного участка Восточного отвала, а также для дополнительного изучения

трансформации инженерно-геологических условий, на северо-западном участке отвала были пробурены четыре наблюдательные скважины глубиной 30,0–55,0 м, общим объемом 182 погонных метров (рисунок 19).

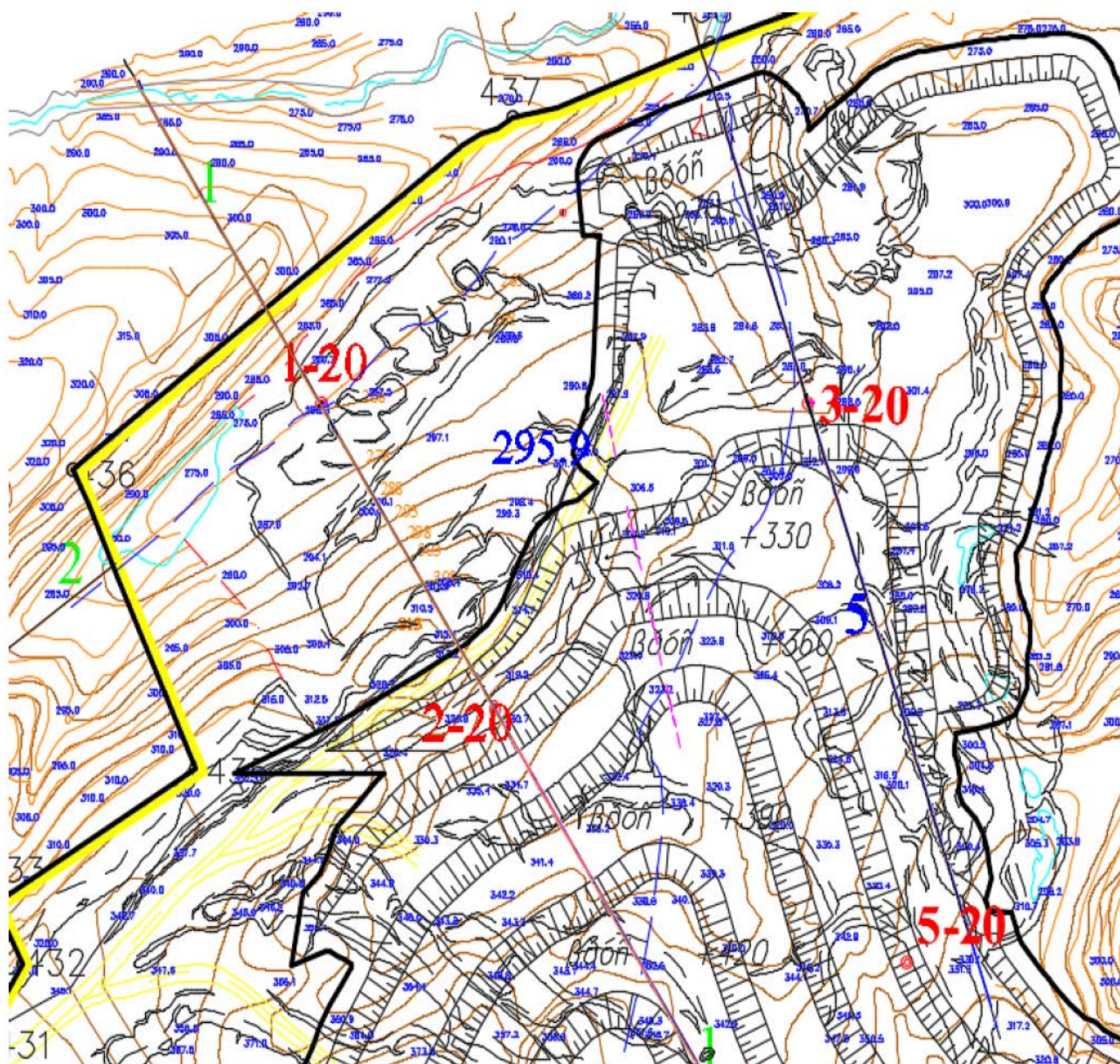


Рисунок 19 – Расположение наблюдательных скважин в северо-восточной части отвала «Восточный»

Извлеченные из них образцы ненарушенного сложения были направлены на лабораторные исследования для установления значений физико-механических свойств насыпных пород и естественных отложений основания.

На основе проведенного анализа записей полевых журналов, в которых указаны характеристики грунтов, определенные визуальным способом и их лабораторного исследования было установлено, что в геологическом строении участка в пределах глубины бурения 55,0 м принимают участие техногенные отложения, четвертичные отложения и пермские отложения с выделением следующих инженерно-геологических элементов.

1. Техногенные отложения, представлены насыпными отложениями, которые по своей сути в соответствии с действующими ГОСТ являются дресвяно-щебенистыми грунтами с суглинистым заполнителем до 30% от легкого пылеватого до тугопластичного, кроме того, присутствуют органические примеси (остатки растений степени разложения), элементы ожелезнения, сформировавшиеся в результате накопления лимонита, гетита и других железосодержащих оксидов и гидроксидов в отдельных частях отложений.

2. Техногенные отложения, являющиеся насыпными грунтами, представлены суглинками песчанистыми мягкопластичными, со значительным (до 50%) количеством щебня и гравия. Вскрытая мощность отложений составляет от 17,0 до 46,6 м, их подошва пересечена на глубинах от 17,0 до 46,6 м., абс. отметки от 269,3 до 300,8 м.

3. Суглинки тяжелые пылеватые мягкопластичные и полутвердые голоценового возраста. Вскрытая буровыми работами на стадии инженерно-геологических изысканий их мощность составляет от 4,6 до 22,6 м, их подошва пересечена на глубинах от 28,3 до 52,5 м, абс. отметки от 254,6 до 296,2 м. Генезис отложения вероятно аллювиальный, что подтверждается расположением скважин в логовых участках и полученными параметрами прочностных свойств.

4. Пермские отложения, представленные алевритами выветрелыми, трещиноватыми с суглинистым заполнителем: суглинками серыми, серо-коричневыми легкими песчанистыми, мягкопластичными. Вскрытая мощность отложений составляет от 1,7 до 3,2 м, их подошва пересечена на глубинах от 30,0 до 55,0 м, абс. отметки от 25,0 до 275,7 м [3].

### 3.2 Оценка пространственной и временной изменчивости прочностных свойств техногенных отложений внешних отвалов

В период с 2016 по 2023 год было отобрано 60 проб техногенных отложений на отвале «Восточный» при помощи бороздового опробования и 15 проб, полученные в результате бурения скважин. Отбор осуществлялся в зависимости от соотношения коренных пород и суглинка, а также только по коренным породам в разных соотношениях литологических разностей (алевролита и песчаника). После пробы были отправлены в лабораторию, в которой при различной вертикальной нагрузке от 0,03 МПа до 2,50 МПа для бороздовых проб и от 0,05 МПа до 0,60 МПа для проб из инженерно-геологических скважин, проводились испытания для определения сдвигающего давления [111]. В результате статистической обработки полученных значений прочности углевмещающих пород кольчугинской серий был осуществлен расчет значений сцепления (C) и угла внутреннего трения ( $\phi$ ) (таблицы 8 и 9).

Таблица 8 – Значения прочностных свойств из бороздовых проб

Состав техногенных отложений	Сцепление, МПа, <u>от-до</u> среднее	Угол внутреннего трения, градусы, <u>от-до</u> среднее	Год отсыпки от-до
Песчаник (фракция 2-5 мм)	$\frac{0,013 - 0,031}{0,024}$	$\frac{24,249 - 28,252}{25,660}$	2010-2015
Алевролит (фракция 2-5 мм)	$\frac{0,021 - 0,046}{0,028}$	$\frac{24,542 - 27,991}{26,503}$	2011-2014
Смесь песчаник/алевролит 70/30 (фракция 2-5 мм)	$\frac{0,015 - 0,037}{0,028}$	$\frac{24,684 - 29,019}{27,001}$	2011-2016
Смесь песчаник/алевролит 50/50	$\frac{0,016 - 0,040}{0,028}$	$\frac{24,576 - 29,013}{27,011}$	2010-2015
Смесь песчаник/алевролит 30/70 (фракция 2-5 мм)	$\frac{0,016 - 0,041}{0,025}$	$\frac{24,634 - 29,013}{26,864}$	2012-2015
Смесь коренные/суглинок 70/30 (фракция 2 мм)	$\frac{0,024 - 0,050}{0,035}$	$\frac{21,384 - 25,788}{23,862}$	2011-2015

Продолжение таблицы 8

Состав техногенных отложений	Сцепление, МПа, от-до среднее	Угол внутреннего трения, градусы, от-до среднее	Год отсыпки от-до
Смесь коренные/суглинок 60/40 (фракция 2 мм)	$\frac{0,017 - 0,042}{0,029}$	$\frac{21,739 - 26,181}{24,422}$	2011-2015
Смесь коренные/суглинок 50/50 (фракция 2 мм)	$\frac{0,042 - 0,059}{0,051}$	$\frac{14,510 - 15,783}{15,253}$	2010-2013
Смесь коренные/суглинок 40/60 (фракция 2 мм)	$\frac{0,034 - 0,052}{0,045}$	$\frac{11,890 - 14,251}{13,110}$	2010-2015
Смесь коренные/суглинок 20/80	$\frac{0,034 - 0,049}{0,040}$	$\frac{10,033 - 12,176}{11,105}$	2012-2014

Таблица 9 – Значения прочностных свойств отложений, отобранных из инженерно-геологических скважин

Состав техногенных отложений	№ Инженерно- геологической скважины	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Год отсыпки	Глубина отбора, м
95% суглинков, 5% дресвы и щебня алевролита и песчаника	5-20	0,098	7,688	2018	23,5
90% суглинок, 10% дресвы и щебня алевролита и песчаника	2-20	0,060	10,942	2017	18,3
90% суглинок, 10% дресвы и щебня алевролита и песчаника	1-21	0,098	7,688	2012	26,7
70% суглинок, 30% дресвы и щебня алевролита и песчаника	1-21	0,130	5,427	2012	29,3
60% суглинок, 40% дресвы и щебня алевролита и песчаника	3-20	0,126	5,264	2016	8
60% суглинок, 40% дресвы и щебня алевролита и песчаника	17Д28024	0,124	5,156	2010	58

Продолжение таблицы 9

Состав техногенных отложений	№ Инженерно-геологической скважины	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Год отсыпки	Глубина отбора, м
50% суглинок, 50% дресвы и щебня алевролита и песчаника	1-20	0,030	10,962	2018	8,5
50% суглинок, 50% дресвы и щебня алевролита и песчаника	5-20	0,128	6,400	2019	9,5
50% суглинок, 50% дресвы и щебня алевролита и песчаника	3-20	0,126	5,264	2016	18,7
40% суглинок, 60% дресвы и щебня алевролита и песчаника	3-20	0,134	5,589	2017	1,8
40% суглинок, 60% дресвы и щебня алевролита и песчаника	2-20	0,134	5,589	2015	33,3
30% суглинок, 70% дресвы и щебня алевролита и песчаника	17Д28024	0,107	5,723	2015	27,5
30% суглинок, 70% дресвы и щебня алевролита и песчаника	2-20	0,107	5,723	2020	8,3
20% суглинков, 80% дресвы и щебня алевролита и песчаника	5-20	0,102	5,203	2016	35,1
10% суглинок, 90% дресвы и щебня алевролита и песчаника	16Д824	0,092	5,463	2020	23,25

Стоит отметить, что с использованием геоинформационных систем и результатов аэрофотосъемки было определено время отсыпки данных техногенных отложений. Так как алевролиты и песчаники на глинистом цементе, которые составляют основную массу вскрышных пород, в приповерхностных условиях с течением времени разрушаются под действием атмосферной влаги и температуры, то для получения наиболее полной информации о свойствах пород опробование планировалось с учетом срока, который отложения находятся в теле отвала.

Анализ полученных результатов статистической обработки зависимостей показал:

1. значения прочностных показателей отвальных смесей (угол внутреннего трения и сцепления) определяются соотношением количества обломков полускальных пород (песчаников и алевролитов) и глинистого заполнителя;

2. прочностные свойства пород закономерно изменяются от времени нахождения в отвальном сооружении, при этом вид функции, по которым происходит изменение, не зависит от соотношения глинистого и полускальных материалов в смеси;

3. полученные математические зависимости показали, что сцепления от времени изменяется по экспоненциальной функции, а угол внутреннего трения по линейной возрастающей функции (рисунок 20 и 21) [111].

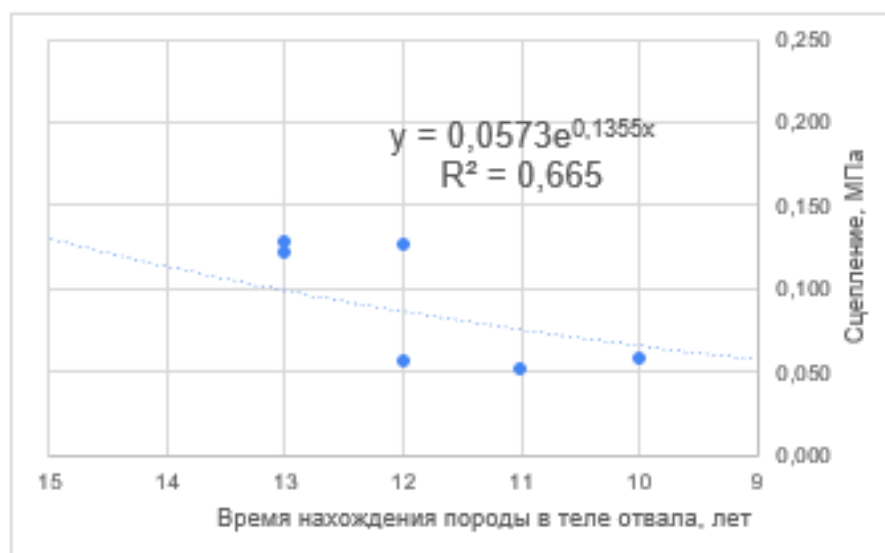


Рисунок 20 – Пример полученной зависимости показателя сцепления от времени нахождения в техногенном массиве для содержания глинистых пород 40-50%



Рисунок 21 – Пример полученной зависимости показателя угла внутреннего трения от времени нахождения в техногенном массиве для содержания глинистых пород 60-80%

Нужно отметить, что в современной практике при оценке устойчивости отвальной насыпи не учитывается изменение физико-механических свойств пород в результате их выветривания под действием внешних факторов (в первую очередь атмосферных осадков), что несомненно снижает достоверность проводимых вычислений. Как показал проведенный выше анализ вскрышные породы кольчугинской серии в поверхностных условиях быстро разрушаются до состояния щебенистых суглинков и щебенистых отложений с суглинистым и супесчаным заполнителем, что потенциально может привести к формированию зон ослабления и проявлению негативных горно-геологических процессов в виде деформаций. Одним из направлений в совершенствовании современных методов оценки состояния внешних отвалов является учет временной изменчивости свойств его отложений для составления прогноза его устойчивости в среднесрочной перспективе и принятия управленческих и проектных решений для обеспечения промышленной и экологической безопасности эксплуатации техногенного объекта и увеличения вместимости для сокращения площади нарушенных земель в результате ведения горных работ.

### **3.3 Выбор и обоснование метода интерполяции показателей физико-механических свойств техногенных отложений в теле отвала**

В горно-геологических информационных системах для интерполяции данных в элементарные единицы блочной модели, как правило, используют метод обратных взвешенных расстояний или один из видов кригинга. Выбор оптимального алгоритма интерполяции становится ключевым для обеспечения сходимости итоговой модели с реальным объектом [87].

Методы кригинга относятся к классу геостатистических интерполяционных алгоритмов, основанных на использовании моделей пространственной корреляции. Их применение требует обязательного построения экспериментальных вариограмм и подбора теоретической вариограммной модели. Как правило, кригинг наиболее эффективно применяется при условии статистически представительной базы данных опробований, позволяющей описать пространственную структуру изменчивости параметров [84]. Тип используемого алгоритма кригинга определяется характером распределения изучаемого параметра и особенностями пространственной корреляции, выявляемыми при анализе вариограмм. Если распределение значений нормальное, а вариограмма показывает стабильную пространственную зависимость, можно использовать простой или обычный кригинг. Но если параметры распределены неоднородно, имеют несколько пиков или их сложно нормализовать, применяют более сложные методы – например, ранговый или полииндикаторный кригинг. Они помогают учитывать нелинейные особенности распределения и наличие нескольких статистических групп. Кригинг работает, взвешивая измеренные данные, чтобы предсказать значения в точках без замеров. Основная формула для интерполяции – это взвешенная сумма известных данных:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(S_i),$$

где  $\lambda_i$  – вес для  $i$ -ой точки,

$Z(S_i)$  – значение параметра в  $i$ -ой точке.

Веса для интерполяции данных в кригинге рассчитываются на основе вариограммной модели. Это подразумевает учет не только расстояний между точками, но и пространственную зависимость значений этих точек, что определяет разные значения весов проб для точек на одном расстоянии, но на разных направлениях относительно определяемой точки. Для этого подбираются вариограммные модели с разными направлениями, задающие тенденцию изменчивости искомого параметра в зависимости от положения точек относительно друг друга.

Метод обратных взвешенных расстояний (IDW) предполагает, что пространственно близкие объекты обладают более сходными свойствами по сравнению с удалёнными. При интерполяции значения в неизвестной точке используются измеренные значения в окружающих точках, причём вклад каждой точки определяется весом, обратно пропорциональным расстоянию до оцениваемой. Таким образом, каждая точка наблюдения оказывает локальное влияние, которое плавно уменьшается по мере увеличения расстояния. Наибольший вклад в итоговое значение вносят ближайшие точки, тогда как влияние удалённых наблюдений существенно ослабляется [93].

В общем случае расчетную формулу, которая используется при интерполяции методом IDW можно представить в виде:

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r_i,$$

где  $r_i$  – значение интерполируемого показателя в  $i$ -ой точке,

$$W_i = \frac{1}{h_i^\beta},$$

где  $h_i$  – расстояние от рассматриваемой точки до точки, в которой известно значение, определяется как расстояние Евклида в трехмерном пространстве:

$$h_i = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты точки, в которой известно значение интерполируемого параметра в элементы блочной модели;

$x_k, y_k$  и  $z_k$  – координаты рассматриваемой точки;

$\beta$  – степенной показатель, который определяет степень влияния близлежащих точек;

$S$  – сумма всех расстояний от рассматриваемой точки до точек замера параметра, возведенных в степень  $\beta$ .

В работах современных специалистов в области блочного моделирования нередко отмечается, что, кригинг относится к наиболее сложным интерполяционным методам. Для его использования необходимо произвести расчет и настройку большого количества параметров, учитывающих пространственные и статистические характеристики исходной генеральной выборки. В противоположность этому, метод IDW реализует более простую концепцию, в которой вес или влияние точки определяется преимущественно расстоянием до оцениваемого положения. При этом в ряде практических задач различие в точности результатов между кригингом и IDW оказывается незначительным, особенно при ограниченном объеме исходных наблюдений.

Среди инструментов интерполяции горно-геологических данных также нередко используется интерполяция методом «ближайшего соседа». При этом происходит деление всей области с помощью линий, проходящих посередине между точками с известными значениями, формируются отдельные области

вокруг каждой исходной точки. Затем всему пространству внутри области присваивается значение точки, вокруг которой оно построено (рисунок 22).

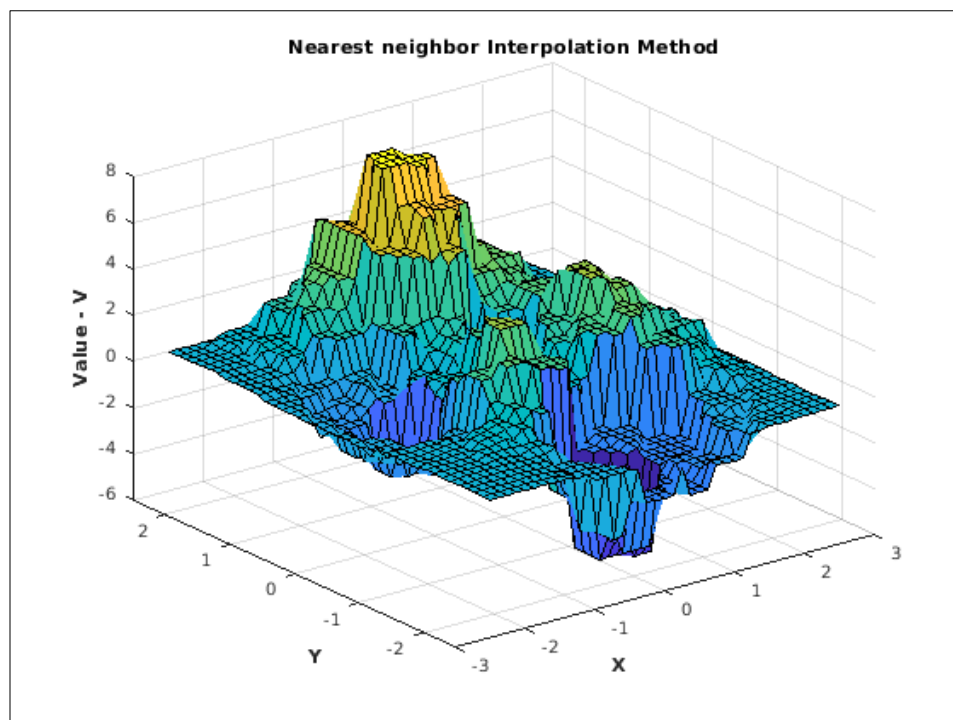


Рисунок 22 – Визуализация интерполяции данных «методом ближайшего соседа»

Этот метод использует слишком грубую интерполяцию, не учитывая возможность того, что оцениваемый параметр может постепенно меняться между известными точками. Когда значения в соседних блоках сильно отличаются, метод создает резкий скачок на границе между ними, даже если расстояния небольшие, а для моделирования параметров внешнего отвала такое резкое изменение маловероятно.

В настоящем исследовании формируется геоинформационная блочная модель, включающая распределение физико-механических свойствах пород внешнего отвала, относящихся к инженерно-геологическим параметрам. В отличие от содержаний полезных компонентов, значения данных параметров определяются в том числе технологическими процессами складирования вскрышных пород, имеющие неоднородный литологический состав, что

существенно осложняет выявление устойчивых геостатистических зависимостей и построение корректных вариограммных моделей.

Так как в рассматриваемом случае для отвала «Восточный» в генеральной выборке относительно малое количество данных, такая же ситуация характерна для абсолютного большинства техногенных сооружений, эксплуатируемых на современных российских горных предприятиях, то для реализации поставленных в рамках данного исследования задач было принято решение использовать в качестве интерполяционного метод обратных взвешенных расстояний. Кроме того, следует отметить, что данные инженерно-геологического опробования, как правило, крайне неравномерно распределены по площади изучаемого техногенного массива, что также определяет выбор IDW в качестве оптимального метода, позволяющего получить наиболее достоверные и самое главное учитывающие геологические и технологические факторы, определяющие пространственное распределение свойств отложений в пространстве.

#### **3.4 Интерполяция данных внутри структур геоинформационной модели внешних отвалов угольных предприятий**

Первостепенная задача при интерполяции данных в геоинформационную модель отвального сооружения состояла в оценке количества суглинков в каждом элементе блочной модели. Перед выполнением интерполяции данных в элементы блочной модели рассматриваемого отвала был проведён предварительный геостатистический анализ данных опробования. Анализ экспериментальных вариограмм, представленных на рисунке 23, показал отсутствие выраженных направлений изменчивости, что объясняется относительно небольшим количеством точек наблюдений и их неравномерным распределением в пределах исследуемой территории [85].

Пространственное расположение точек опробования в плане характеризуется вытянутостью в северо-западном направлении, что

соответствует направлению развития отвала вскрышных пород. С учётом данной особенности при задании параметров для интерполяции была принята анизотропная область поиска в форме эллипсоида, форма которого показана на рисунке 24.

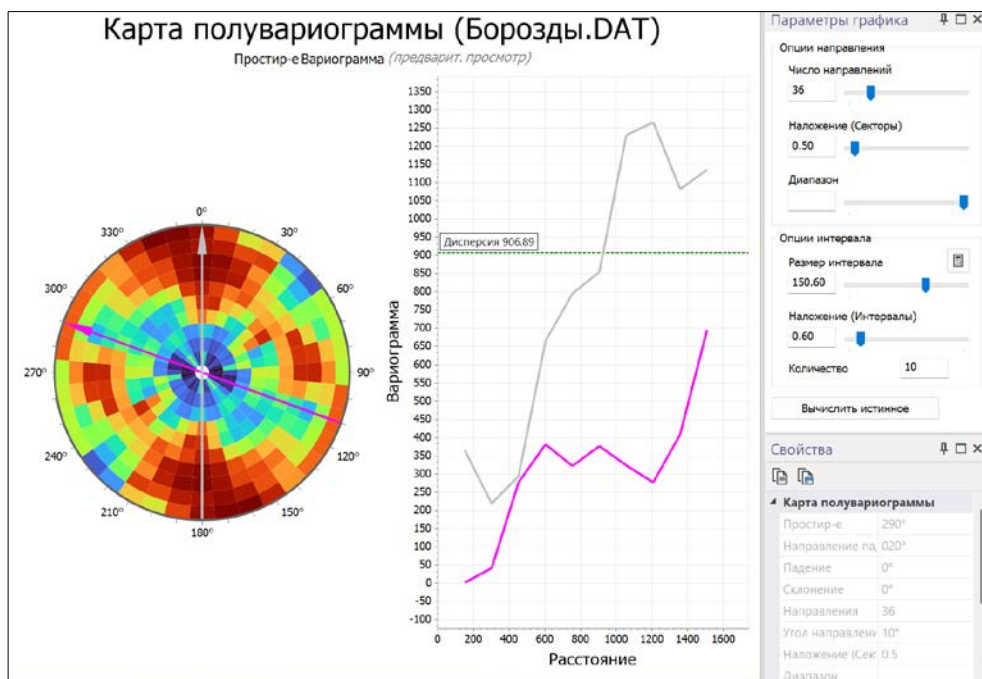


Рисунок 23 – Экспериментальная карта вариограмм параметра содержания суглинков

Эллипс поиска представляет собой ключевой параметр алгоритмов геостатистической интерполяции, определяющий пространственную область, в пределах которой отбираются исходные данные для оценки значения целевого параметра в оцениваемом блоке. Данная конструкция служит инструментом локализации влияния проб и учета анизотропии пространственной изменчивости свойств, позволяя задать направление и степень корреляции параметра в соответствии с геологической или технологической структурой объекта. Корректная настройка размеров осей, ориентации и соотношения радиусов эллипса обеспечивает геологическую достоверность модели, предотвращая возникновение артефактов интерполяции.

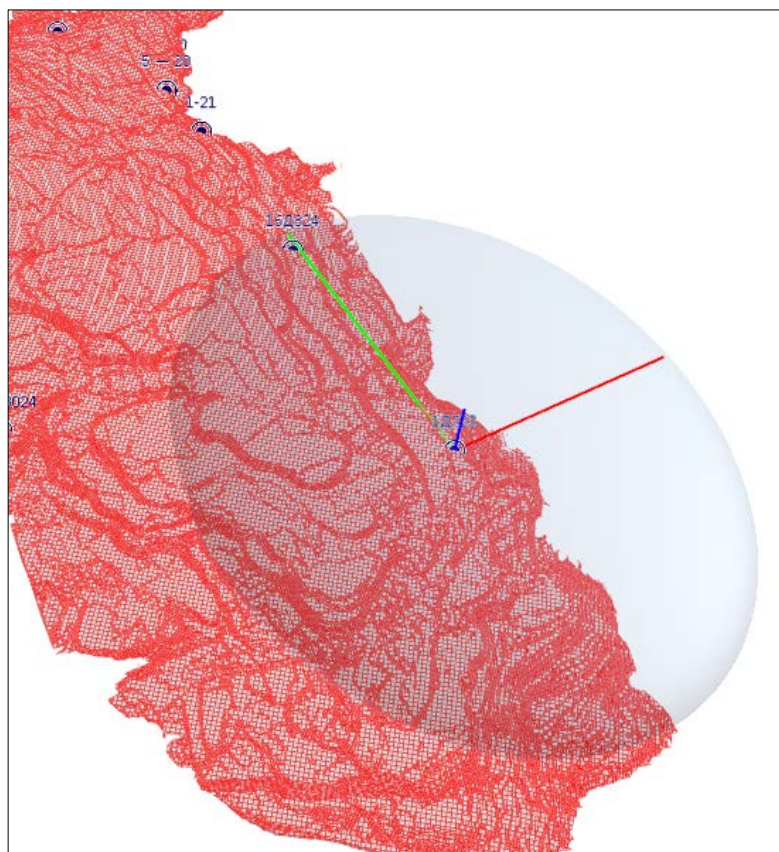


Рисунок 24 – Визуализация эллипса поиска в горно-геологической информационной система Micromine

Для рассматриваемого примера соотношение осей эллипса принято  $1:0,8:0,2$ . Главная ось направлена по азимуту  $322^\circ$ , что совпадает с основным направлением фронта отвалообразования. Две остальные оси расположены перпендикулярно главной. Выбранное соотношение горизонтальных осей  $1:0,8$  помогает снизить влияние точек с противоположных частей фронта отсыпки. Вертикальная ось с коэффициентом  $0,2$  значительно уменьшает шанс включения в расчёт точек с других ярусов отвала. Это важно для многоярусных техногенных массивов, где вертикальные изменения состава могут быть значительными. Кроме того, чтобы ещё сильнее ограничить влияние точек из других ярусов, применяют ограничение по опорному полю счёта. Эта функция задаёт минимальное или максимальное опорное значение, по которому определяют, включать данные в оценку или нет. В исследовании установлено, что в зоне поиска должно быть, как минимум две точки из поля «Скважины».

Использование данного подхода помогает избежать ситуации, когда блоки оцениваются с помощью точек из разных ярусов отвала, которые физически не связаны с самим блоком. Благодаря этому модель получается более корректной и при правильной настройке параметров интерполяции появляется возможность получить наиболее достоверную оценку параметров, соответствующую реальному объекту.

В расчётной формуле для метода обратных взвешенных расстояний для рассматриваемого объекта параметр  $\beta$  приняли равным двум. Такое значение наиболее часто используют при работе с геологическими данными. Оно позволяет сгладить интерполяцию между известными точками и оценить блоки более плавно. В общем случае значение параметра  $\beta$  может быть обоснованно статистически или с использованием метода кросс-валидации, однако для этого необходимо иметь достаточно большой объем исходных данных, который для случая с внешним отвалом «Восточный» отсутствовал.

Оценку блочной геоинформационной модели отвала проводили в три этапа, постепенно увеличивая радиус области поиска. На первом шаге использовали эллипсоид с размером 400 м, что давало локальную оценку при достаточно плотных данных. На втором этапе увеличили область до 600 м, чтобы оценить блоки, по которым на первом этапе данных было недостаточно. На третьем этапе применили эллипсоид с размером 1000 м (таблица 10), чтобы охватить оставшиеся блоки, которые не удалось оценить раньше.

Таблица 10 – Параметры этапов интерполяции данных блочной модели

Интерполируемый параметр	Номер прогона	Область поиска	Min количество точек, которое должно попасть в эллипс	Степенной параметр $\beta$
Содержание суглинков	1	Эллипс 400м	2	2
	2	Эллипс 600м	2	2
	3	Эллипс 1000м	2	2

Такая поэтапная схема позволяет сначала использовать ближайшие данные, а если их не хватает – подключать к расчету более удалённые точки. Этот подход совпадает с современными методами геоинформационного моделирования горно-геологических объектов и помогает повысить точность итоговой модели.

На основе модели с оцененным содержанием суглинков в блоке проводилась оценка физико-механических свойств. Для этого используют результаты статистического анализа, описанного в предыдущей главе. Выявленные линейные и экспоненциальные зависимости позволяют составить уравнения для расчёта угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от содержания суглинков в породе (таблица 11 и таблица 12).

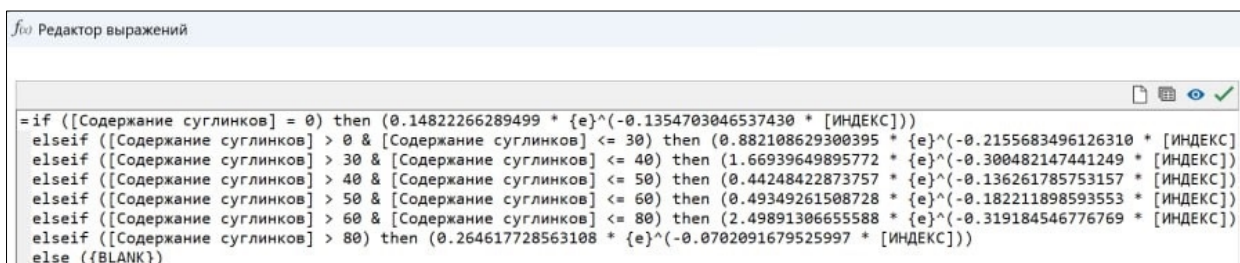
Таблица 11 – Показатели зависимостей изменения сцепления от времени нахождения отложений в теле отвала

Содержания глинистого заполнителя	$C = ae^{bt}$	
	a	b
0	0,0573	0,1355
0-30	0,0049	0,2155
30-40	0,0012	0,3004
40-50	0,0168	0,1363
50-60	0,0062	0,1822
60-80	0,0011	0,3192
80-100	0,0491	0,0702

Таблица 12 – Показатели зависимостей изменения угла внутреннего трения от времени нахождения отложений в теле отвала

Содержания глинистого заполнителя	$y = kx+m$	
	k	m
0	-0,6526	33,7424
0-30	-1,7347	38,3107
30-40	-2,5955	50,0431
40-50	-0,8730	20,4116
50-60	-1,3147	27,2404
60-80	-1,5380	28,0911
80-100	-0,5066	12,5563

Поэтому для каждого блока с учетом времени нахождения отложений в теле массива в геоинформационной модели применялась формула, соответствующая диапазону содержания суглинков, чтобы определить параметры угла внутреннего трения и сцепления (рисунок 25).



```
=if ([Содержание суглинков] = 0) then (0.14822266289499 * {e}^(-0.1354703046537430 * [ИНДЕКС]))
elseif ([Содержание суглинков] > 0 & [Содержание суглинков] <= 30) then (0.882108629300395 * {e}^(-0.2155683496126310 * [ИНДЕКС]))
elseif ([Содержание суглинков] > 30 & [Содержание суглинков] <= 40) then (1.66939649895772 * {e}^(-0.300482147441249 * [ИНДЕКС]))
elseif ([Содержание суглинков] > 40 & [Содержание суглинков] <= 50) then (0.44248422873757 * {e}^(-0.136261785753157 * [ИНДЕКС]))
elseif ([Содержание суглинков] > 50 & [Содержание суглинков] <= 60) then (0.49349261508728 * {e}^(-0.182211898593553 * [ИНДЕКС]))
elseif ([Содержание суглинков] > 60 & [Содержание суглинков] <= 80) then (2.49891306655588 * {e}^(-0.319184546776769 * [ИНДЕКС]))
elseif ([Содержание суглинков] > 80) then (0.264617728563108 * {e}^(-0.0702091679525997 * [ИНДЕКС]))
else ({BLANK})
```

Рисунок 25 – Пример работы математического модуля горно-геологической информационной системы

В результате выполненной интерполяции была сформирована геоинформационная блочная модель внешнего отвала, содержащая для каждого блока параметры: содержание суглинков, угол внутреннего трения, сцепление и время формирования вскрышного блока (рисунок 26). Анализ модели показывает, что выявленные зоны с высокими содержаниями суглинка в северо-западной части совпадают с участками, на которых наблюдаются деформационные процессы, зафиксированные геомеханической службой предприятия и приведшие к приостановке отвалообразования.

Таким образом на основании выявленных зависимостей и принципов блочного моделирования построена геоинформационная модель с учетом распределения соотношений содержания глинистого заполнителя и коренной породы, а также пространственно-временной изменчивости физико-механических параметров, характеризующих отложения внешних отвалов угольных карьеров.

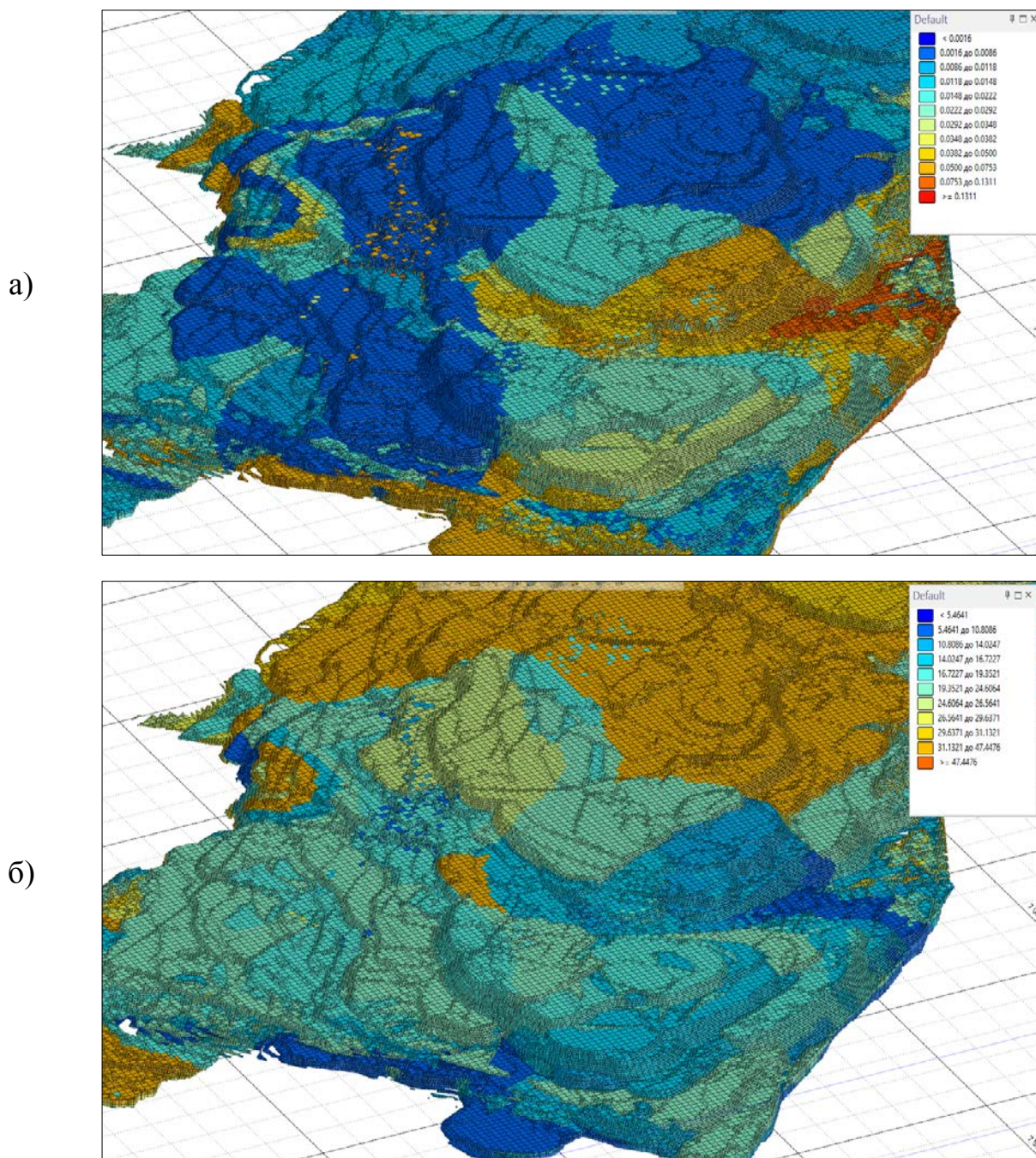


Рисунок 26 – Визуализация распределения физико-механических параметров в геoinформационной модели с учетом пространственно-временной изменчивости: а – сцепления, б – угла внутреннего трения

### 3.5 Оценка достоверности модели

Проведённый в рамках диссертационного исследования анализ и последующее построение геoinформационной блочной модели внешнего отвала

«Восточный» позволяют провести содержательное сопоставление полученных модельных представлений с фактическими данными мониторинга, представленными в отчёте ООО НПФ «КАРБОН», выполненном в 2023 году. Для заверки данных геоинформационной модели использовался принцип «верификации» - на основе экспертных заключений, выполненных специализированной организацией. Данное сравнение имеет принципиальное значение для верификации предложенной методологии, поскольку демонстрирует не только качественную, но и количественную сходимость результатов, полученных принципиально разными подходами: детерминированными расчётами устойчивости по отдельным профилям и вероятностно-статистическим блочным моделированием с учётом пространственно-временной изменчивости свойств массива [112].

Прежде всего, необходимо отметить совпадение в идентификации наиболее слабых зон в теле откосного сооружения. Экспертный отчёт, основанный на данных гидрогеомеханического мониторинга и расчётах в программном комплексе Phase2 (рисунок 27), выделяет профили 2-2, 4-4 и 5-5 (см. рисунок 19) как участки, где коэффициент запаса устойчивости фактического положения откосов не достигает нормативного значения 1,30 для основного сочетания нагрузок.

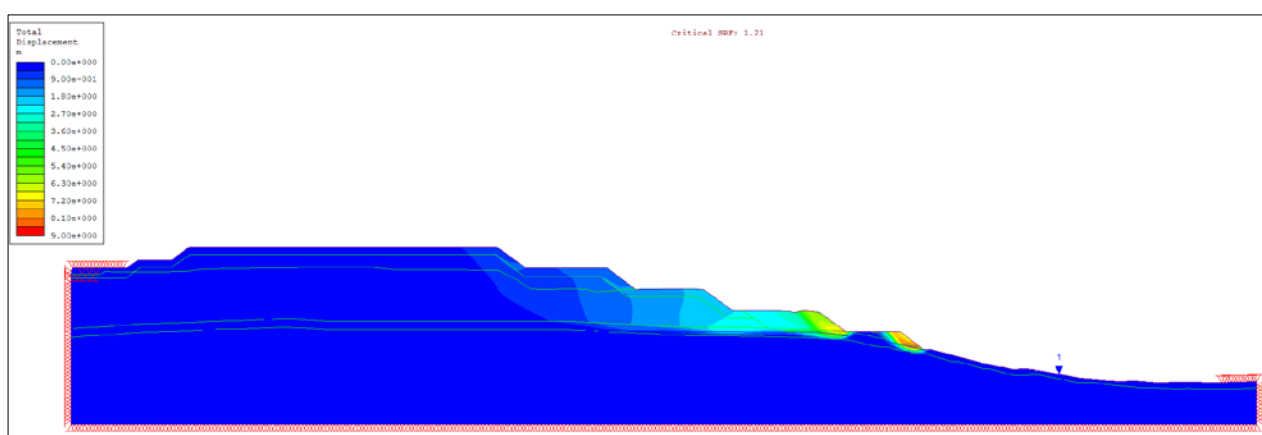


Рисунок 27 – Результаты расчета устойчивости откосного сооружения по профилю 5-5 в программном продукте Phase 2 (коэффициент запаса устойчивости равен 1,21)

Расчеты, выполненные по профилю 5-5 показывает состояние техногенной насыпи как близкое к предельному равновесию, особенно в нижней части откоса. Это подтверждается как расчётами, так и наблюдениями геометрии деформированного склона [112]. Результаты моделирования, представленные в данной работе, показывают схожую картину: зоны с пониженными значениями сцепления и угла внутреннего трения, полученные методом обратных взвешенных расстояний с учётом анизотропии, сосредоточены на северо-западе и востоке отвала, где находятся профили 4-4 и 5-5. Помимо этого, метод субблокирования с размером блока 5×5×5 метров позволил точно определить границы между слоями отсыпки разных лет. Это важно для правильного учёта различий в прочностных свойствах. Именно в этих зонах модель показывает самые заметные изменения в сторону уменьшения физико-механических характеристик, что создаёт условия для появления поверхностей скольжения и совпадает с наблюдениями, свидетельствующими о высоких деформациях на этих участках.

Наконец, стоит выделить методологическое преимущество блочного геоинформационного моделирования при работе с разнородными данными. Экспертный подход основывается на ограниченном числе наблюдательных скважин и периодических топографических съёмках. Это даёт точные данные только на конкретных участках изучения. Блочная модель, наоборот, создаёт непрерывное трёхмерное отображение объекта. Данная возможность необходима для планирования заложения пунктов сбора данных в рамках выполняемого мониторинга состояния техногенного сооружения. Анализ модели позволяет обосновать рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий (в части минимально необходимых объемов исследований и позиционировании скважин для изучения структуры массива и отбора проб), организации маркшейдерских наблюдательных пунктов.

Таким образом, сравнение результатов исследования с данными мониторинга и экспертными оценками показывает хорошую сходимость в оценке состояния отвала «Восточный». Результаты геоинформационного

моделирования не только повторяют положение проблемных зон, которые были обоснованы в экспертном заключении, но и предоставляет новые инструменты для анализа пространственно-временной изменчивости свойств массива, а также для планирования и принятия управленческих решений, связанных с развитием сети мониторинга и планирования горных работ, а также обеспечением безопасной эксплуатации сооружения. Геоинформационная модель не является заменой существующим методам, а дает возможность их развития, создавая информационную платформу, которая поможет принимать более обоснованные и быстрые решения по обеспечению промышленной безопасности при формировании отвалов в сложных горно-геологических условиях.

### **3.6 Выводы по главе 3**

В данной главе рассмотрены вопросы интеграции показателей пространственно-временной изменчивости физико-механических характеристик техногенных отложений в структуру геоинформационной модели внешних отвалов. Выполненный анализ результатов инженерно-геологических изысканий, включающих лабораторные исследования проб отвальных отложений, позволил установить закономерности изменения прочностных свойств пород во времени, что составляет основу разработанного подхода к моделированию техногенных массивов.

Установлено, что параметры прочности отвальных смесей определяются в первую очередь соотношением скального обломочного материала и глинистого заполнителя. Статистическая обработка результатов лабораторных испытаний показала характер изменения прочностных свойств пород, уложенных в отвал, во времени: сцепление возрастает по экспоненциальной зависимости, а угол внутреннего трения убывает по линейной при увеличении срока нахождения горных пород в теле отвала. Параметры данных зависимостей дифференцированы по семи интервалам содержания глинистого заполнителя,

что обеспечивает достаточную детализацию при моделировании распределения свойств неоднородных по составу отвальных массивов.

Обоснование метода интерполяции в элементарные единицы блочной модели выполнено на основе сравнительного анализа алгоритмов кригинга, обратных взвешенных расстояний (IDW) и ближайшего соседа. С учётом ограниченного объёма исходных данных опробования, их неравномерного пространственного распределения выбран метод обратных взвешенных расстояний, позволяющий получить наиболее достоверные результаты и самое главное учитывающие геологические и технологические факторы, определяющие пространственное распределение свойств отложений в пространстве.

В качестве примера была построена геоинформационная модель внешнего отвала «Восточный», включающая для каждой элементарной единицы (блока) параметры содержания суглинков, угла внутреннего трения, сцепления и времени формирования. Визуальный и количественный анализ модели с использованием принципа «верификации» выявил пространственную корреляцию между зонами повышенного содержания глинистого заполнителя (>60 %) в северо-западной части отвала с участками, где геологической и маркшейдерской службами предприятия зафиксированы признаки деформационных процессов.

Преимущество разработанного подхода заключается в возможности интеграции разнородных данных инженерно-геологических, гидрогеологических и маркшейдерских изысканий в единое непрерывное трёхмерное представление объекта. Блочная модель обеспечивает интерполяцию точечных данных с учётом геологических факторов и технологических особенностей формирования отвала. Это создаёт основу для оптимизации сети геотехнического мониторинга: на основе результатов моделирования можно обосновать рекомендации по закладке дополнительных наблюдательных скважин именно в зонах с наибольшей неопределённостью параметров отложений отвала.

#### **4 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ В КАЧЕСТВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

##### **4.1 Интеграция данных гидрогеологических изысканий и мониторинга в геоинформационную модель внешнего отвала**

Наращивание высоты отвальных сооружений неизбежно влечет за собой изменение напряженно-деформированного состояния массива под воздействием возрастающей нагрузки от вышележащих отвальных масс. По мере увеличения нормальных напряжений происходит уплотнение техногенного массива, сопровождающееся изменением гранулометрического состава, а также физико-механических и фильтрационных свойств пород. В частности, наблюдается снижение пористости и коэффициента фильтрации. Указанные изменения при условии инфильтрационного питания способствуют аккумуляции влаги внутри техногенного массива и формированию техногенного водоносного горизонта, охватывающего значительный объем техногенных отложений. Наличие воды в теле откоса определяет перераспределение удерживающих и сдвигающих сил в откосном сооружении за счет гидростатического взвешивания и гидродинамического давления, что непосредственно снижает коэффициент запаса устойчивости. Исходя из этого, процедура обоснования устойчивости внешних отвалов должна в обязательном порядке включать предварительное прогнозирование режимных характеристик подземных вод в формируемых отвальных сооружениях [13].

Рассмотрим гидрогеологические условия отвала «Восточный», формирование которого началось в 1997 году на основании проектной документации «Проект строительства I очереди разреза «Галдинский» производственного объединения «Кемеровоуголь» (Сибгипрошахт, 1987 г). В

2025 году с целью актуализации проектных решений подготовлена проектная документация: «Технический проект разработки «Талдинского каменноугольного месторождения», ОАО «Кузбассгирпрошахт», Кемерово», который имеет положительное заключение ЦКР-ТПИ «Роснедр» (протокол заседания от 30.10.2018 г., № 256/18 – стп).

Гидрогеологическая характеристика изучаемого региона обусловлена его приуроченностью к периферийной зоне Кузнецкого артезианского бассейна пластово-блокового типа, в районе сочленения с гидроструктурами Салаирского бассейна. Для коренных осадочных пород данного района, представленных преимущественно алевролитами и песчаниками с неоднородной интенсивностью трещиноватости свойственно развитие трещинно-пластовых вод. Наибольшее развитие подобные подземные воды получают в верхней зоне коренных пород, подверженных процессам выветривания. В данной части разреза алевролиты и песчаники наиболее дезинтегрированы, а соответственно имеют большую трещиноватость, а соответственно и водовмещающие и фильтрационные свойства. В свою очередь рыхлые отложения, сложенные преимущественно суглинками и глинами, определяют формирование маловодных горизонтов грунтовых вод.

На основании литолого-фациальных и стратиграфических критериев в осадочной толще Ерунаковского геолого-экономического района дифференцируются три гидрогеологических комплекса, соответственно, сложенных четвертичным и мезозойскими отложениями, а также относящимися к толще продуктивной кольчугинской серии.

Обводненность четвертичных отложений характеризуется выраженной пространственной неравномерностью. На водоразделах данные образования практически лишены водоносности, в отличие от подножий склонов, речных долин и ложбин. Также в районе развиты водоносные горизонты, ассоциированные с аллювиальными галечниковыми отложениям р. Томи.

Питание всех водоносных комплексов и четвертичного и коренных полускальных пород осуществляется за счет инфильтрации дождевых и талых

вод. В понижения рельефа наблюдается дополнительный приток подземных вод из более глубоких горизонтов.

В целом гидрогеологические условия рассматриваемой территории относительно простые. Отдельно рассмотрим факторы, влияющие на формирование техногенных водоносных горизонтов в теле внешних отвалов. Стоит отметить, что обводненность отвалов – это особенность, которая наблюдается при освоении месторождений, находящихся в толще осадочных горных пород, которые быстро разрушаются под воздействием экзогенных факторов. Укладываемый материал в отвалы угледобывающих предприятий с одной стороны содержит, как правило, достаточно большое количество глинистых и суглинистых отложений, с другой стороны коренные породы в результате выветривания превращаются в материал с крайне пестрым гранулометрическим составом. Перечисленные обстоятельства в целом определяют относительно низкие показатели фильтрации в теле отвала, что в конечном итоге и определяет возможность формирования техногенных водоносных горизонтов, которые могут охватывать 70 и более процентов его объема.

По данным бурения, выполненного на отвале «Восточный» в 2022 году, на участке в скважинах 3-20 и 2-20 (см. рисунок 19) были зафиксированы уровни техногенного водоносного горизонта на глубине 0,0-1,0 м, что свидетельствует о 100% уровне обводнения данного участка отвала и его основания. Питание техногенного водоносного горизонта тела отвала осуществляется за счет атмосферных осадков. В период сезонных колебаний (весеннего снеготаяния и во время обильных дождей) возможно повышение уровня подземных вод на 1-2 м. В 2016 году была выполнена исследовательская работа, объектом изучения которой являлся Восточный отвал филиала «Талдинский угольный разрез», сделаны предварительные оценки условий фильтрации воды в откосной его части, приуроченной к логовому участку. Данные условия являются наиболее неблагоприятными из всех рассмотренных на изучаемом отвальном объекте.

Нужно отметить, что именно высокая обводненность отвалов становится ключевым фактором аварийных ситуаций, вызванных оползнями, примером служит отвал №1 разреза «Заречный», на котором произошла нештатская ситуация в 2015 году. Развитие деформационного процесса, приведшего к образованию катастрофического оползня объемом 27 млн. м<sup>3</sup> в части насыпи, приуроченной к логовому участку основания отвала, характеризующейся развитием водоносного горизонта и максимальной степенью обводненности отложений.

Для построения трехмерной поверхности техногенного водоносного горизонта были использованы данные, полученные в результате многолетнего мониторинга состояния отвального массива, детального анализа аэрофотосъемочных материалов разных лет, а также в результате натурных полевых обследований (рисунок 28). Интеграция разнородных источников информации позволила обеспечить высокую достоверность и пространственную полноту моделирования гидрогеологических условий техногенного массива [75].



Рисунок 28 – Фиксация высачиваний воды в отвальном сооружении

Исходными данными для моделирования послужили показания датчиков порового давления, установленных в наблюдательных скважинах 1-20, 2-20, 3-20, 5-20 и 1-21 (см. рисунок 19), которые демонстрируют распределение гидростатических напоров в теле отвала и его основании. Анализ временных рядов наблюдений показал, что в техногенных глинистых и четвертичных отложениях основания сохраняются значительные по величине напоры, причем датчики, установленные как в теле насыпи, так и в естественных глинистых отложениях, демонстрируют идентичные тенденции изменения порового давления, что свидетельствует о тесной гидрогеологической связи между техногенным массивом и его основанием.

Дополнительно были использованы данные о положении уровней воды в скважинах, зафиксированные в ходе сезонных наблюдений, информация о фильтрационных выходах на откосах отвала, а также результаты визуального обследования участков заболачивания и проявления суффозионных процессов. Анализ аэрофотосъемочных материалов позволил выявить пространственное распределение участков с повышенной влажностью поверхности, что послужило косвенным индикатором положения техногенного водоносного горизонта в зонах, не охваченных инструментальными наблюдениями.

Все полученные данные были систематизированы и визуализированы в горно-геологической информационной системе (рисунок 29). Выбор данного типа программного обеспечения обусловлен ее широкими возможностями в области трехмерного геологического моделирования, наличием проверенных алгоритмов пространственной интерполяции, а также возможностью интеграции разнородных данных в единую координатную основу. В частности, все данные были приведены к местной системе координат СК-42, зона 15, что обеспечило корректную пространственную привязку результатов моделирования к другим компонентам цифровой модели отвала.



для этого использовались показания наблюдательных скважин на единую дату, что позволило минимизировать влияние сезонных колебаний уровня подземных вод на итог моделирования.

С помощью программного обеспечения Micromine методом обратных взвешенных расстояний с дополнительным сглаживанием с использованием алгоритма минимальной кривизны были построены изогипсы и цифровая модель поверхности техногенного водоносного горизонта в теле отвального сооружения (рисунок 30).

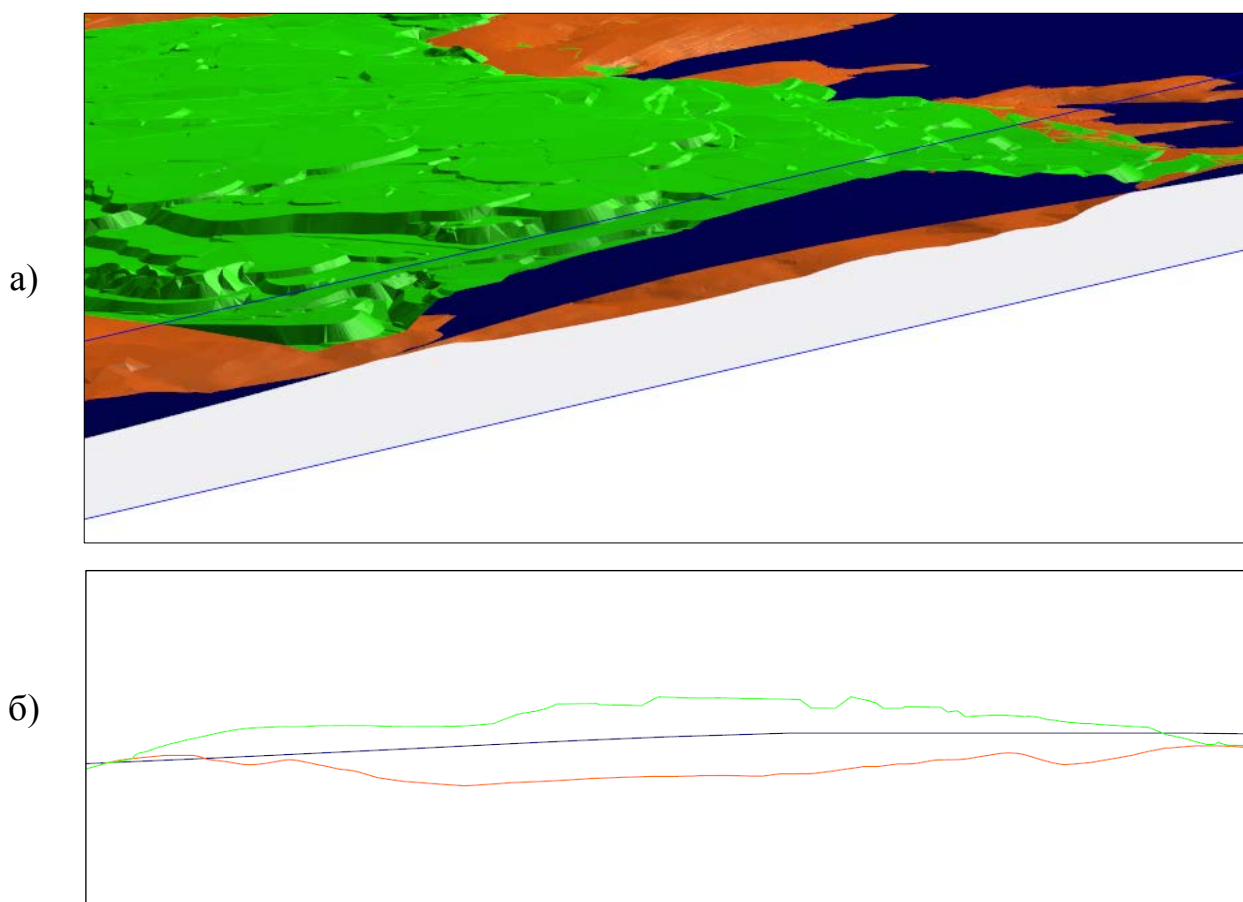


Рисунок 30 – Визуализация уровня техногенного водоносного горизонта в теле отвала: а) отображение в трехмерном виде б) сечение через отвальное сооружение. Цветами обозначены: зеленым – поверхность отвала, синим – поверхность техногенного водоносного горизонта, оранжевым – основание техногенного сооружения и естественный рельеф

Выбор такого сочетания методов объясняется особенностями исходных данных: метод обратных взвешенных расстояний учитывает локальные изменения уровня возле скважин, где данные плотнее, а алгоритм минимальной кривизны, применяемый для сглаживания, основывается на минимизации кривизны поверхности, что дает более сглаженную поверхность, проходящую через исходные данные с минимальными изгибами. Такой подход хорошо подходит для моделирования техногенных водоносных горизонтов, где резкие перепады уровней невозможны в силу особенностей строения техногенного сооружения.

Для построения модели была создана регулярная сетка с ячейками 10×10 метров – это позволило достаточно детально проследить локальные изменения абсолютной отметки. Границы моделирования были ограничены контуром отвального сооружения с добавленной буферной зоной 100 метров, чтобы избежать ошибок на краях модели.

Анализ полученной цифровой модели показал некоторые закономерности в распределении обводненности отвала. В верхней части (абсолютные отметки +380...+420 м) водоносный горизонт находится на глубине 15-25 метров от поверхности, что говорит о достаточно благоприятных условиях для фильтрации и снижения порового давления в мониторинговых скважинах. В центральной части отвала (отметки +330...+380 м) уровень обводненности достаточно высокий – на глубине 5-10 метров от поверхности уже отмечается водоносный горизонт, что соответствует наблюдениям высокого порового давления в мониторинговых скважинах, расположенных в этой зоне.

Наиболее неблагоприятная гидрогеологическая обстановка зафиксирована на нижнем ярусе отвала, особенно в логовых участках на северо-западе. Здесь зафиксирован ряд водопроявлений (высачивание воды) на откосе нижнего яруса, а пройденные скважины показывают, что обводненные породы залегают на глубине менее 1 метра. Эти данные свидетельствуют о том, что на данном участке с течением времени после отсыпки произошло формирование техногенного

водоносного горизонта, оказывающего негативное влияние на устойчивость отвальной насыпи.

Результаты моделирования могут быть использованы для обоснования рекомендаций по размещению дополнительных наблюдательных скважин в зонах с наибольшей неопределенностью положения водоносного горизонта, а также для проектирования дренажных мероприятий.

Таким образом, применение современных методов трехмерного моделирования в сочетании с комплексом данных мониторинга и натурных наблюдений позволило создать достоверную цифровую модель поверхности техногенного водоносного горизонта, которая является важным инструментом для оценки гидрогеомеханического состояния отвала, прогнозирования развития фильтрационных процессов и обоснования мероприятий по обеспечению устойчивости отвального сооружения на всех этапах его формирования.

#### **4.2 Прогнозирование распределения прочностных показателей отложений внешних отвалов с использованием построенной геоинформационной модели**

Необходимость прогнозирования распределения прочностных показателей в теле внешних отвалов обусловлена природой техногенных массивов, свойства которых претерпевают существенные изменения под воздействием комплекса природных и технологических факторов. Процессы выветривания, уплотнения под нагрузкой вышележащих толщ, изменения гранулометрического состава и степени обводненности приводят к закономерным изменениям физико-механических характеристик. Игнорирование временного фактора при оценке устойчивости откосов означает использование усредненных значений сцепления и угла внутреннего трения, что неизбежно ведет к снижению достоверности при определении коэффициента запаса устойчивости в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Для определённых участков отвала коэффициент запаса может быть значительно завышен, что в конечном итоге может обусловить

выбор проектных решений, которые приведут к аварийным ситуациям со значительными негативными последствиями. Прогнозирование изменения прочностных параметров от времени нахождения пород в отвале, позволяет перейти к предупреждающему развитию опасных геомеханических процессов еще на стадии проектирования [111].

Разработанная в рамках диссертационного исследования геоинформационная модель предоставляет возможность не только ретроспективной оценки текущего состояния техногенного массива, но и оперативного прогнозирования пространственного распределения прочностных характеристик при различных сценариях развития горных работ. Ключевым преимуществом предложенного подхода является возможность оценки физико-механических свойств с учетом литологической неоднородности отвальных пород, их степени обводненности и временных этапов формирования массива.

В качестве примера приведен прогноз изменения прочностных характеристик ранее рассмотренного отвала «Восточный». В качестве исходных данных были использованы материалы «Технического проекта разработки Талдинского каменноугольного месторождения. Дополнения 2», разработанного проектным институтом ОАО «Кузбассгирпошахт» в 2025 году. Из данного документа было получено положение отсыпки отвального сооружения на 2026 год, которое загружено в ГГИС, результаты данного этапа представлены на рисунке 31.

Далее используя импортированные данные о проектном положении отвала, была построена цифровая модель поверхности на конец 2026 года, а следующим этапом замкнутый солид отсыпки. Затем было выполнено построение пустой блочная модель запроектированной к формированию в 2026 году части отвала, ей была дополнена уже существующая геоинформационная блочная модель отвала «Восточный». Также для повышения достоверности геометрических характеристик отвала было выполнено субблокирование блочной модели (рисунок 32).

Отдельно нужно отметить, что проектом предусмотрено формирование тела отвала из смеси отложений в соотношении 80% коренных пород, 20% суглинков [12].

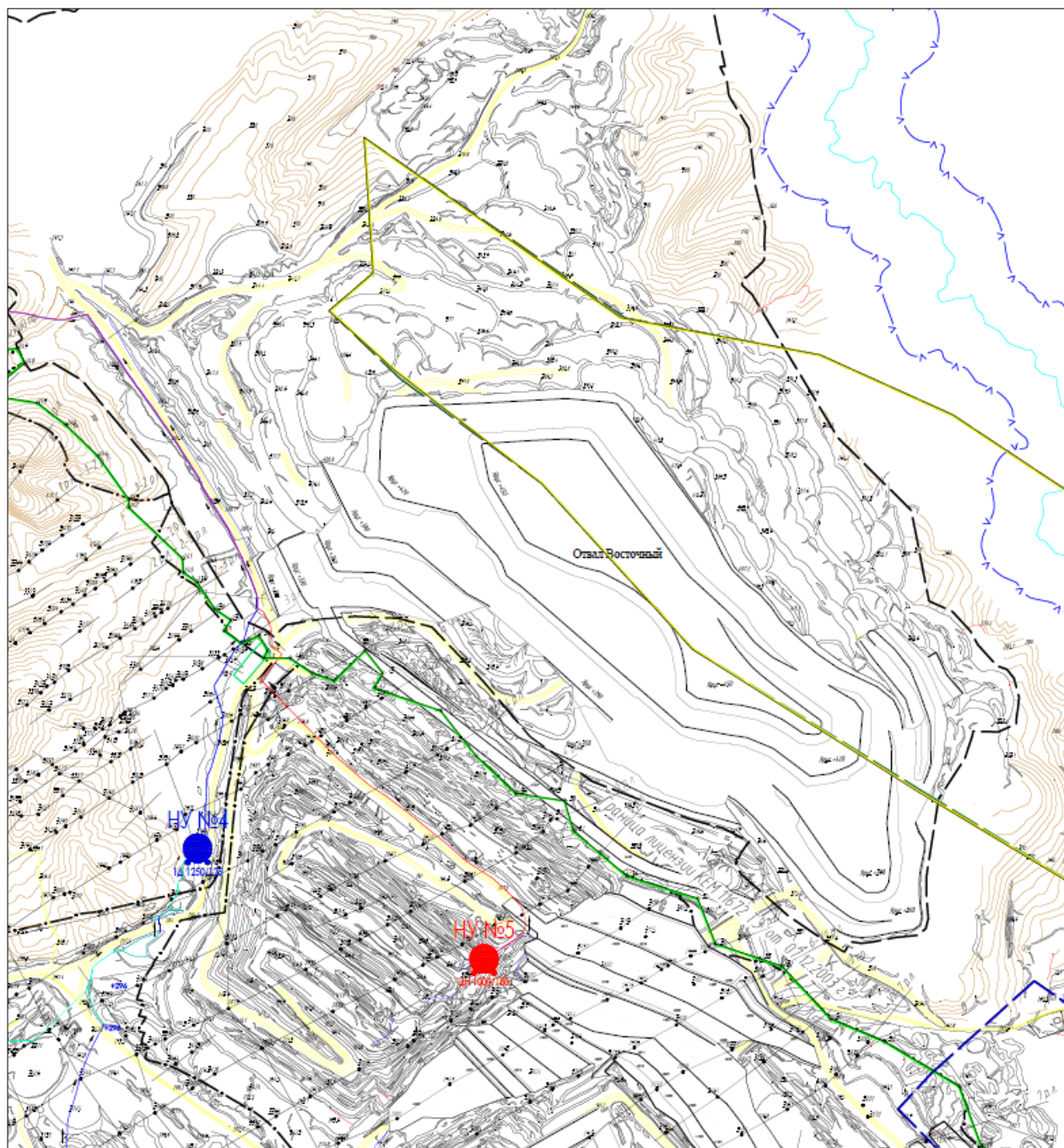


Рисунок 31 – Выкопировка из ситуационного плана проектного положение отвала на конец 2026 года

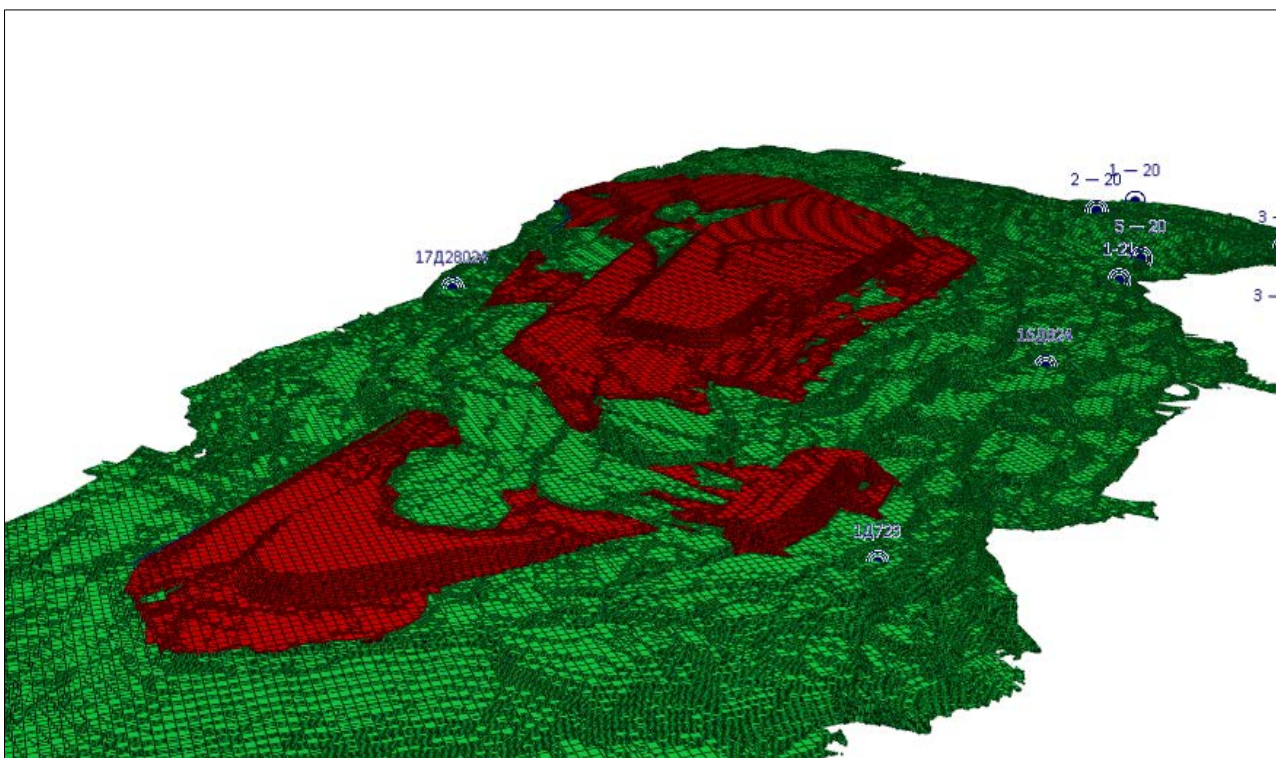


Рисунок 32 – Визуализированное в горно-геологической информационной системе проектное положение отвальных работ на конец 2026 года

Для прогнозирования распределения свойств в массиве были использованы ранее полученные формулы зависимостей сцепления и угла внутреннего трения от времени нахождения в отвальном сооружении. С учетом соотношения суглинистого заполнителя и коренной породы значения в элементах блочной модели были пересчитаны по состоянию на конец 2026 года. Структура выходной блочной модели представлена на рисунке 33.

Геоинформационная модель с проектным положением на 2026 год была отображена в ГГИС и проанализирована. Результатом чего явились рекомендации для осуществления дополнительного визуального контроля в пределах зон с наименьшими значениями прочностных характеристик и тех участков, где наблюдается наиболее значительное изменение угла внутреннего трения и сцепления. Анализ блочной модели, содержащей информацию по показателю содержания суглинков, а также полученные значения сцепления путем расчета на основе выявленных экспоненциальных зависимостей, а также

угла внутреннего трения полученные на основе линейных зависимостей (рисунок 34), показал четкую зональность распределения прочностных параметров, обусловленную литологическим составом поступающих в отвал пород.

	EAST	NORTH	RL	_EAST	_NORTH	_RL	ИНДЕКС	ВОЗРАСТ	Литология	Содержание суглинков	ГОД ОТСЫПКИ	Сцепление	Угол внутреннего трения
196	15167.500000	5985.000000	247.000000	6.000000	3.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
197	15166.000000	5982.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
198	15163.000000	5994.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	20	7	Насыпной грунт	0.0000	2020	0.007	33.090
199	15173.500000	5991.000000	247.000000	6.000000	9.000000	3.000000	24	3	Насыпной грунт	25.0000	2024	0.003	43.515
200	15172.000000	5985.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
201	15175.000000	5985.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
202	15157.000000	5997.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
203	15157.000000	6001.500000	250.000000	3.000000	6.000000	3.000000	25	2	Насыпной грунт	25.0000	2025	0.002	45.250
204	15157.000000	6001.500000	247.000000	3.000000	6.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
205	15157.000000	6003.000000	244.000000	3.000000	3.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
206	15157.000000	6006.000000	250.000000	3.000000	3.000000	3.000000	24	3	Насыпной грунт	25.0000	2024	0.003	43.515
207	15157.000000	6006.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
208	15157.000000	6006.000000	244.000000	3.000000	3.000000	3.000000	11	16	Насыпной грунт	0.0000	2011	0.022	27.216
209	15157.000000	6009.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
210	15157.000000	6009.000000	244.000000	3.000000	3.000000	3.000000	11	16	Насыпной грунт	0.0000	2011	0.022	27.216
211	15169.000000	5997.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	24	3	Насыпной грунт	25.0000	2024	0.003	43.515
212	15166.000000	5997.000000	247.000000	3.000000	3.000000	3.000000	20	7	Насыпной грунт	0.0000	2020	0.007	33.090
213	15161.500000	6003.000000	247.000000	6.000000	15.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
214	15161.500000	6009.000000	244.000000	6.000000	3.000000	3.000000	11	16	Насыпной грунт	0.0000	2011	0.022	27.216
215	15160.000000	6004.500000	244.000000	3.000000	6.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
216	15163.000000	6006.000000	244.000000	3.000000	3.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
217	15166.000000	6004.500000	247.000000	3.000000	12.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
218	15166.000000	6007.500000	244.000000	3.000000	6.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
219	15169.000000	6001.500000	247.000000	3.000000	6.000000	3.000000	20	7	Насыпной грунт	0.0000	2020	0.007	33.090
220	15169.000000	6007.500000	247.000000	3.000000	6.000000	3.000000	13	14	Насыпной грунт	0.0000	2013	0.017	28.522
221	15169.000000	6009.000000	244.000000	3.000000	3.000000	3.000000	10	17	Насыпной грунт	0.0000	2010	0.025	26.564
222	15172.000000	5998.500000	247.000000	3.000000	6.000000	3.000000	24	3	Насыпной грунт	25.0000	2024	0.003	43.515

Рисунок 33 – Структура блочной модели

В верхней части отвального массива (абсолютные отметки +420...+450 м) получены относительно низкие значения сцепления, что соответствует преобладанию в составе отвальной массы песчаников и алевролитов с минимальным содержанием глинистого заполнителя соответствуя принятым проектным решениям в части соотношения коренных и глинистых пород – 80/20. На горизонтах +390...+420 в основании отсыпаемого яруса северо-восточной части можно выделить участок с высоким содержанием суглинков, что может в дальнейшем привести к оползневым явлениями. Для этого рекомендуется до начала отсыпки организовать визуальный осмотр территории с возможным отбором проб и уточнении литологического состава техногенных отложений.

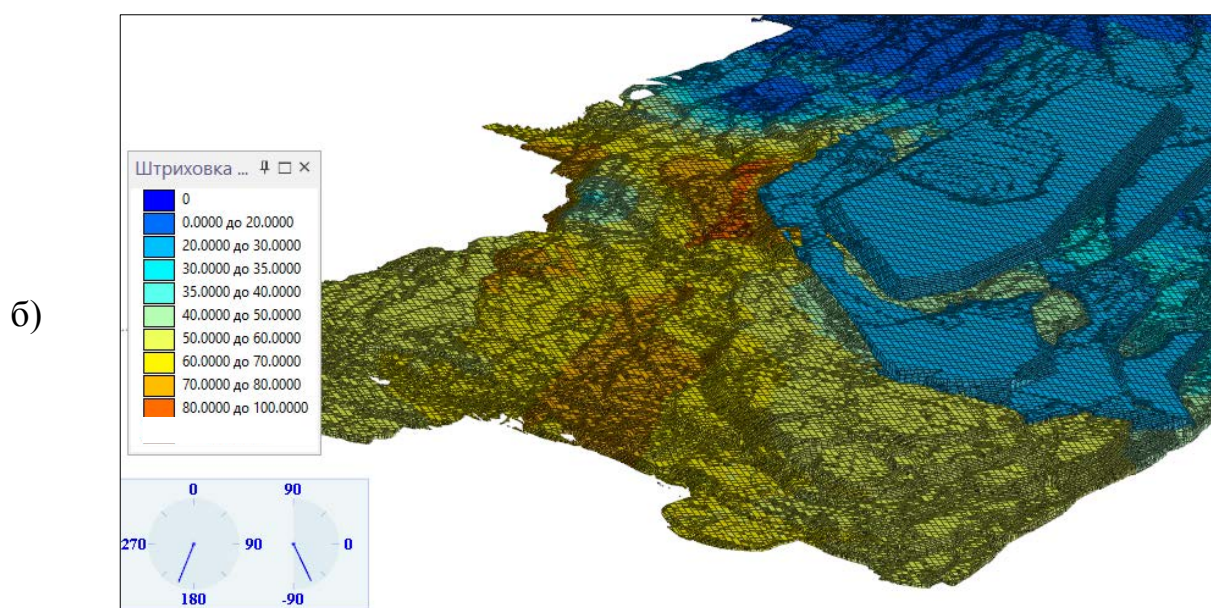
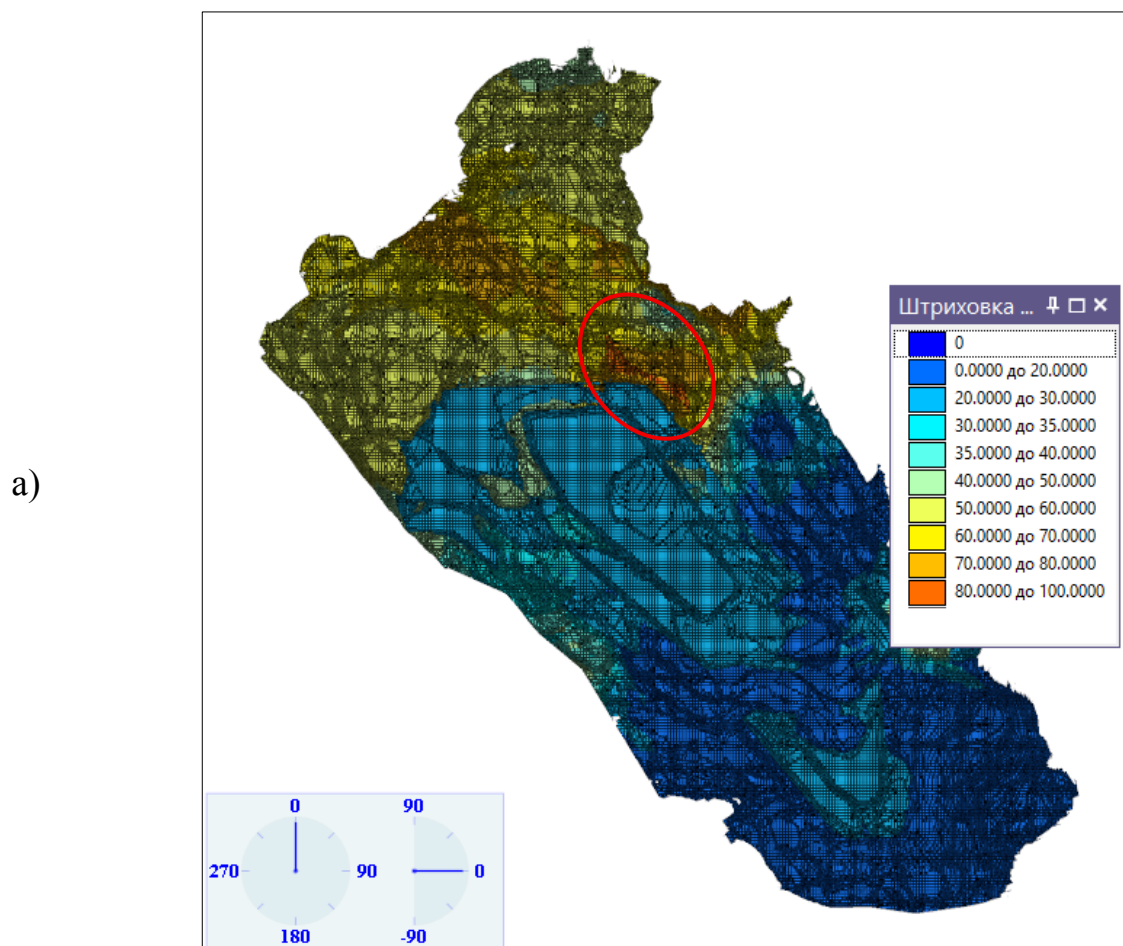


Рисунок 34 – Визуализация геоинформационной модели для прогноза: а) вид геоинформационной модели отфильтрованной по показателю суглинка в плане (красным цветом отмечена зона с высоким содержанием суглинистого заполнителя); б) укрупненный вид северно-восточной части отсыпки

При отсыпке необходимо уделять внимание этому участку, в случае наличия на откосе видимых заколов и трещин, организовать наблюдательные станции, а также соответственно проведение дополнительных инженерно-геологических изысканий [112].

Практическая значимость разработанной прогнозной модели заключается в возможности заблаговременного выявления зон риска, организации мониторинга и возможности корректировки планов ведения горных работ. Таким образом разработанная геоинформационная модель является информационным обеспечением не только для оценки текущего состояния внешнего отвала, но для прогнозных расчетов с учетом пространственно-временной изменчивости характеристик отложений. В конечном итоге это является основой для принятия обоснованных управленческих решений. Внедрение предложенного подхода в практику работы предприятия обеспечит соответствие современным требованиям промышленной безопасности и способствует повышению эффективности горного производства.

#### **4.3 Разработка рекомендаций по использованию геоинформационной модели внешних отвалов при решении задач мониторинга их состояния, планирования и развития систем отвалообразования**

В современной практике геомеханического обеспечения открытых горных работ используется подход, при котором оценка устойчивости отвалов реализуется в большинстве случаев, опираясь на усредненные показатели свойств пород, полученные на одном из этапов геологоразведочных работ или специально проведенных инженерно-геологических изысканий [33]. Однако техногенные массивы представляют собой сложные инженерно-геологические системы, свойства которых не являются константой. В процессе нахождения пород в отвале под воздействием атмосферных осадков, температурных колебаний и давления вышележащих толщ происходят существенные изменения

их структуры. Происходят процессы выветривания, уплотнения, изменения влажности и гранулометрического состава. Игнорирование этих факторов при проектировании может привести к некорректной оценке коэффициента запаса устойчивости [9].

Предлагаемый геоинформационный метод базируется на принципах блочного моделирования. Данная технология позволяет разделить техногенный массив на множество элементов, каждому из которых присваиваются определенные свойства. Ключевой особенностью подхода является учет фактора времени. Модель формируется не как статичный объект, а как динамическая система, учитывающая время отсыпки. Это достигается путем интеграции данных маркшейдерских съемок, результатов инженерно-геологических изысканий и гидрогеологического мониторинга в единую цифровую среду.

Важным аспектом является возможность прогнозирования изменения прочностных характеристик. Исследования показывают, что такие параметры, как сцепление и угол внутреннего трения, имеют четкие закономерности изменения во времени. Например, в первые десять лет после отсыпки показатель сцепления техногенных отложений склонен к увеличению по нелинейной зависимости, в то время как угол внутреннего трения может снижаться. Учет этих трендов позволяет переходить от статистического управления к прогнозному [111].

Геоинформационная модель становится основой для создания геомеханической модели месторождения, требование о наличии которой закреплено в современных федеральных нормах и правилах промышленной безопасности. Это делает внедрение описываемых методов не просто рекомендацией по оптимизации, а необходимым условием соблюдения законодательства для крупных горнодобывающих предприятий. Итоговая структура геоинформационного метода моделирования представлена на рисунке 35.

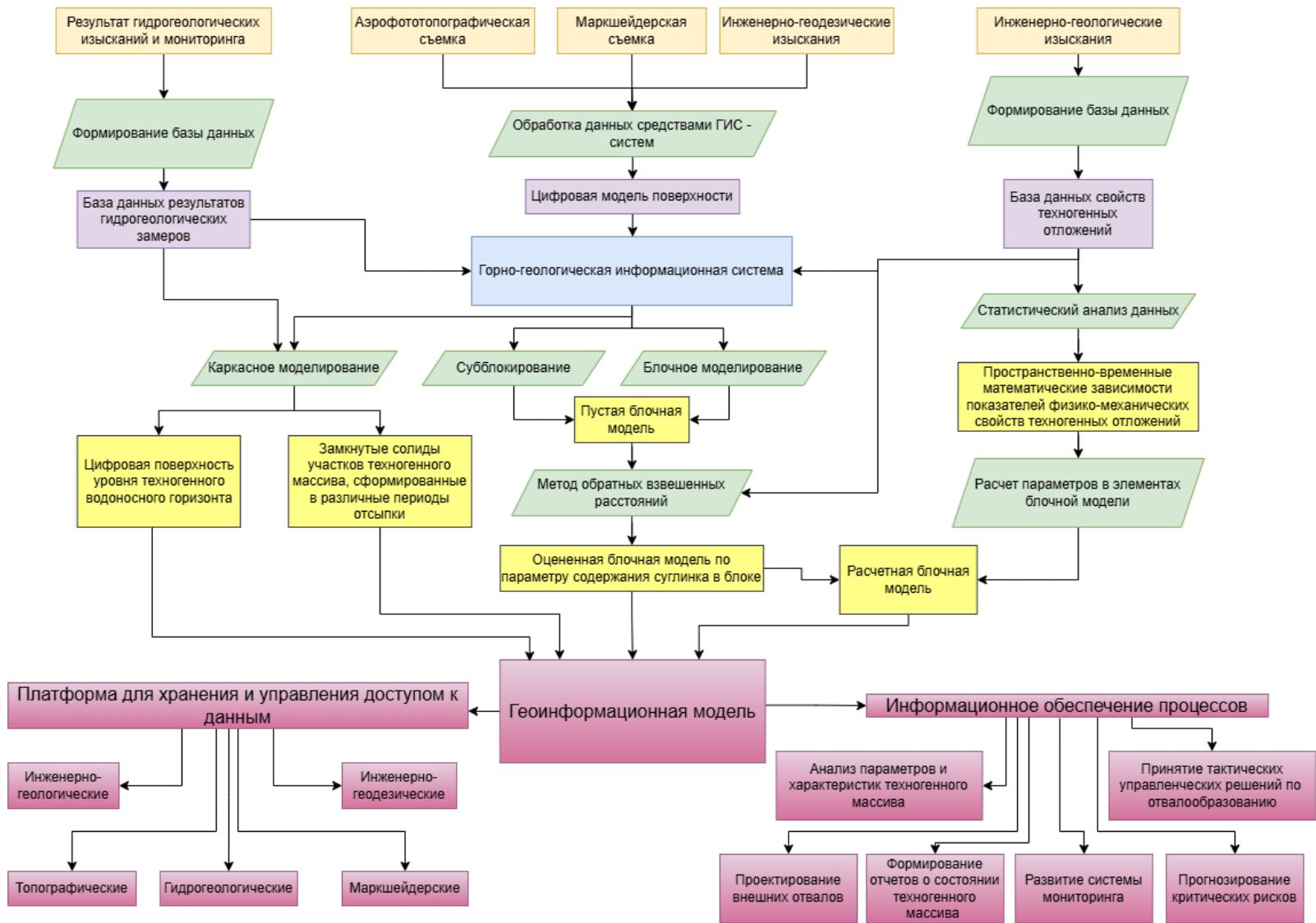


Рисунок 35 – Структура геоинформационного обеспечения оценки состояния техногенных массивов

На основе проведенных исследований был разработан ряд рекомендаций. В первую очередь, необходимо отметить, что для успешной реализации принципов геоинформационного моделирования требуется комплексный подход, затрагивающий различные структурные подразделения предприятия. Ниже приведены подробные рекомендации, сгруппированные по функциональным направлениям деятельности отделов предприятия.

## 1. Организация системы мониторинга и сбора данных.

1.1 Создание специализированной рабочей группы. Рекомендуется выделить отдельную группу или назначить ответственных сотрудников в рамках существующего отдела мониторинга, в чьи обязанности войдет систематическое пополнение геоинформационной базы данных. Работы по наполнению данными геоинформационной модели должны быть организованы как регулярный процесс, синхронизированный с циклом горных работ.

1.2 Интеграция методов дистанционного зондирования. Для актуализации геометрических параметров отвала необходимо использовать современные методы аэрофототопосъемки, в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это позволяет получать высокоточные цифровые модели рельефа с высокой периодичностью. Данные съемки должны оперативно загружаться в геоинформационную систему для корректировки каркасов модели отсыпки техногенного сооружения по годам.

1.3 Расширение программы инженерно-геологических изысканий. При расширении техногенного массива и продолжению работ по отвалообразованию необходимо получение дополнительных значений физико-механических показателей за счет инженерно-геологических изысканий. Рекомендуется разработать дополнительную программу изучения физико-механических свойств техногенных отложений отвальных сооружений. Отбор проб необходимо проводить с привязкой к времени нахождения пород в отвале, что позволит накапливать статистику для уточнения пространственно-временных зависимостей.

1.4 Гидрогеологический контроль. Учитывая влияние обводненности на устойчивость, необходимо вести регулярный мониторинг уровней техногенного водоносного горизонта. Данные пьезометрических наблюдений должны интегрироваться в геоинформационную модель для построения цифровых поверхностей техногенного водоносного горизонта, что необходимо при расчете коэффициента запаса устойчивости.

## 2. Актуализация моделей.

2.1 Разработка и уточнение математических зависимостей. На основе накапливаемых данных лабораторных испытаний рекомендуется регулярно проводить статистический анализ изменения прочностных характеристик. Выявленные пространственно-временные зависимости изменчивости свойств техногенных отложений (сцепления, угла внутреннего трения) должны уточняться за счет вновь полученных данных. Эти зависимости станут основой для автоматического пересчёта свойств геоинформационной модели при её обновлении.

2.2 Интерполяция данных в блочную модель. При актуализации математических зависимостей необходимо производить операцию интерполяции формул в элементы блочной модели. Это обеспечивает актуальность распределения физико-механических параметров в геоинформационной модели используя принцип «адаптивности», позволяющий актуализировать параметры с учетом добавления новых входных данных.

2.3 Учет литологической неоднородности. Необходимо учитывать соотношение отсыпаемых пород при отвалообразовании и место их складирования, чтобы модель корректно отражала зоны потенциального ослабления, связанные с наличием значительной доли глинистых включений.

## 3. Планирование горных работ и проектирование отвальных сооружений.

3.1 Учет зон риска при проектировании. При разработке планов развития горных работ и проектировании контуров отвалообразования необходимо учитывать данные геоинформационной модели о распределении физико-механических свойств пород. Зоны с высоким содержанием глинистого

материала и низкими прочностными характеристиками могут быть выявлены заблаговременно, что позволит скорректировать схему отсыпки.

3.2 Прогнозирование изменения устойчивости во времени. Проектные решения не должны опираться только на текущем состоянии отвала. Необходимо учитывать, что прочностные свойства пород, уложенных в тело отвала, со временем изменяются для определенных соотношений пород. Это особенно важно для долгосрочного планирования.

3.3 Оптимизация вместимости. Использование геоинформационной модели позволяет использовать площади под отвалообразование более рационально. За счет учета реальных физико-механических свойств пород и их пространственно-временной изменчивости можно обосновывать увеличение вместимости отвалов без ущерба для промышленной безопасности.

#### 4. Обеспечение безопасности техногенного сооружения

4.1 Интеграция с геомеханической моделью месторождения. Согласно действующим Федеральным нормам и правилам (в частности, приказам Ростехнадзора №439), для объектов с объемом разработки более одного миллиона кубических метров горной массы требуется создание геомеханической модели. Разработанная геоинформационная модель отвала должна стать составной частью этой системы. Она предоставляет необходимые данные для анализа изменения горно-геологических условий и прогнозирования рисков.

4.2 Организация инструментальных наблюдений. Службе главного геолога и службе главного маркшейдера рекомендуется использовать данные геоинформационной модели для планирования маркшейдерских наблюдательных станций и участков необходимых для более детального инженерно-геологического изучения. Геоинформационная модель позволяет выявлять потенциально опасные участки, где вероятность развития деформаций наиболее высока.

4.3 Разработка регламентов реагирования. На основе прогнозов геоинформационной модели должны быть разработаны внутренние регламенты действий специалистов при отклонении фактических показателей от полученных

в результате моделирования. Это включает в себя порядок приостановки работ, проведения внеочередных обследований и внесения корректировок в технические проекты разработки.

5. Управление данными и организация прозрачной системы хранения информации

5.1 Единая цифровая среда. Необходимо стремиться к созданию единой цифровой информационной платформы, где данные, получаемые в процессе геологоразведки, добычи полезного ископаемого и отвалообразования хранятся в совместимых форматах. Единая цифровая среда позволит исключить потерю информации на любом из этапов жизненного цикла предприятия.

5.2 Версионность и история изменений. Геоинформационная модель должна поддерживать хранение истории изменений модели. Необходимость заключается в анализе возможных возникающих сценариев, а также для подтверждения корректности принятых решений.

5.3 Обучение персонала. Внедрение новых методов моделирования требует повышения квалификации сотрудников в соответствующей области. Инженерно-технические работники должны быть обучены работе с горно-геологическими информационными системами и пониманию принципов интерпретации результатов геоинформационного метода моделирования.

Реализация вышеуказанных рекомендаций позволит предприятию достичь ряда стратегических целей.

1. Повышение уровня промышленной безопасности. Возможность прогнозирования пространственно-временной изменчивости свойств пород позволяет предотвращать развитие деформаций на ранних стадиях. Снижается риск возникновения оползней и других аварийных сценариев.

2. Рост экономической эффективности. Оптимизация параметров отвалов и увеличение их вместимости за счет применения разработанных методов геоинформационного моделирования позволяют снизить затраты на транспортировку пород на большие расстояния, а также поиска дополнительных площадей для отвалообразования.

3. Формирование базы знаний предприятия. Накопленные данные о техногенном массиве становятся ресурсом предприятия, который может быть использован для совершенствования технологий на других участках добычи или при разработке новых месторождений.

#### **4.4 Вывод по главе 4**

В четвертой главе диссертационного исследования решена комплексная задача интеграции гидрогеологических данных в структуру геоинформационной модели для прогнозирования состояния отвалов на основе проектных решений с учетом пространственно-временной изменчивости прочностных характеристик.

Разработан подход к построению трехмерной поверхности техногенного водоносного горизонта на основе интеграции разнородных данных мониторинга, включая показания датчиков в наблюдательных скважинах, визуального мониторинга и зафиксированные выходы воды на откосах отвального сооружения. Применение программного комплекса Micromine с использованием комбинированного алгоритма интерполяции (метод обратных взвешенных расстояний со сглаживающей функцией минимальной кривизны) позволило создать цифровую модель техногенного водоносного горизонта отвала «Восточный» с детализацией, достаточной для выявления локальных зон повышенного обводнения.

На основе разработанной геоинформационной модели реализован подход к прогнозному распределению прочностных показателей отвальных пород с учетом фактора времени. Интеграция установленных в предыдущих главах эмпирических зависимостей изменения сцепления и угла внутреннего трения в алгоритм интерполяции значений в блоки модели позволила оценить распределение прочностных характеристик в теле техногенной насыпи на конец 2026 года. Прогнозное моделирование на основе проектных положений отвала выявило зоны потенциального риска в основании северо-восточной части

формируемого яруса +390...+420, где высокое содержания суглинистого заполнителя создает предпосылки для развития деформационных процессов.

На основе полученных результатов сформулированы практические рекомендации по внедрению и эксплуатации геоинформационной модели внешних отвалов на горнодобывающем предприятии. Предложенная структура геоинформационного обеспечения, включающая модули сбора данных, их обработки, блочного и каркасного моделирования, прогнозирования и поддержки принятия решений, обеспечивает цифровизацию управления отвальными сооружениями на всех этапах жизненного цикла. Так же было показано, что разработанная геоинформационная модель отвала может соответствовать требованиям Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности в части создания геомеханической модели месторождения и может служить ее составной частью [91]. Внедрение предложенного подхода обеспечивает не только повышение обоснованности проектных решений и эффективности мониторинга, но и создает основу для оптимизации параметров отвалообразования, увеличения вместимости сооружений без ущерба для безопасности и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [113].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача по разработке геоинформационных принципов моделирования внешних отвалов угольных разрезов.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором.

1. Анализ опыта построения цифровых моделей техногенных массивов горных предприятий показал недостаточность геоинформационного обеспечения процесса оценки состояния внешних отвалов на объектах угледобывающей отрасли, что возможно устранить путем последовательного применения подходов, аналогичных построению блочных моделей рудных тел.

2. При оценке пространственного распределения характеристик отложений в геоинформационной модели отвала необходимо учитывать соотношение уложенного глинистого материала и коренных пород в различных его частях, данный фактор является определяющим для величин сцепления и угла внутреннего трения отложений техногенного массива.

3. На одном из этапов при создании геоинформационной модели внешнего отвала необходимо проведение математического описания зависимостей изменения пространственно-временных характеристик горных пород, слагающих техногенный массив.

4. Комплекс, включающий принципы каркасного и блочного моделирования, в том числе методы интерполяции данных, получившие широкое применение в практике оценки рудных месторождений, а также современный инструментарий горно-геологических информационных систем, является методической основой для построения геоинформационных моделей внешних отвалов угледобывающих предприятий. Указанный набор подходов позволяет отобразить форму и пространственное расположение техногенного массива и

отдельных его частей, а также оценить распределение свойств отложений в его теле.

5. Для повышения качества интерполяции данных в геоинформационной модели внешних отвалов установлены зависимости изменения прочностных характеристик слагающих техногенный массив отложений во времени, для сцепления они имеют экспоненциальный возрастающий характер, а для угла внутреннего трения – убывающий линейный в первые 10 лет после укладки материала в техногенный массив.

6. Разработаны принципы («этапности», дискретности», «комплексности» «верификации», «адаптивности») построения цифровой модели внешнего отвала, позволяющие оценить распределение физико-механических свойств пород, слагающих отвальное сооружение.

7. Предложена структура геоинформационного обеспечения оценки состояния техногенных массивов, позволяющая принимать эффективные решения по увеличению вместимости отвалов, повышения экологической и промышленной безопасности их эксплуатации с учетом прочностных характеристик пород, свойственных для Кузнецкого угольного бассейна.

8. Сформированы рекомендации по использованию геоинформационной модели внешнего отвала в качестве информационного обеспечения процессов геолого-маркшейдерских работ в части проведения инженерно-геологических изысканий и реализации аэрофотосъемок, геомеханического мониторинга, планирования отвалообразования.

Результаты диссертационного исследования используются при построении геоинформационных моделей отвальных сооружений на Галдинском угольном разрезе.(приложение А).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьева О.М., Колесникова Л.А., Меркулова А.М. и др. Анализ экологических проблем в угледобывающих регионах // Уголь. – 2020. – № 10. С. 62-67.
2. Likhman A. Geological block model as the key asset of a mining enterprise // *Zoloto i tekhnologii*. – 2020. – No. 3. – P. 42–46.
3. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д., Мухина А.С. Инженерно-геологические и экологические проблемы при эксплуатации и рекультивации высоких отвалов на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 164–178. DOI:10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_164
4. Тедикова А.А., Красноцветов М.А. Использование ГГИС Micromine для моделирования участка угольного месторождения // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов - от прогноза к добыче; — М.: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2020. — с. 187-188.
5. Аленичев В.М., Аленичев М.В. Повышение достоверности геоинформационного обеспечения при отработке техногенных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2019. – № 11. – С. 172–179. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-172-179.
6. Уразова Н.Г., Мартынюк А.В. Управление рисками на основе моделирования продолжительности реализации проекта // Вестник ИрГТУ. 2014. №8 (91). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-riskami-na-osnove-modelirovaniya-prodolzhitelnosti-realizatsii-proekta> (дата обращения: 09.03.2026).
7. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Мухина А.С., Мосейкин В.В. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы восстановления нарушенных земель при отвалообразовании на открытой угледобыче в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 5–24. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_0\_5

8. Ольховатенко, В. Е. Инженерная геология угольных месторождений Кузнецкого бассейна / В. Е. Ольховатенко ; Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2014. –150 стр.

9. Васильева А.Д. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / А.Д. Васильева ; место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». — Санкт-Петербург, 2019. — 186 с. : ил.

10. Жариков, В. П. Рациональное землепользование при формировании отвалов и гидроотвалов на разрезах Кузбасса/ В. П. Жариков, В. В. Ермошкин, Р. Г. Клейменов // ГИАБ. – 2012. – №2.

11. Заостровский А.Н. Петрографический состав балахонской и кольчугинской серий углей Кузбасса / А.Н. Заостровский, А.В. Петрушина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2025. — № 5 (171). — С. 91–100. — УДК 662.741. — ISSN 1999-4125.

12. Технический проект разработки Талдинского каменноугольного месторождения в границах лицензии на право пользования недрами КЕМ 11672 ТЭ филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез». Дополнение № 3 / ОАО «Кузбассгипрошахт». — Кемерово, 2025.

13. Ческидов В. В., Липина А. В., Красноцветов М. А. Моделирование уровня техногенного водоносного горизонта в отвалах угольных разрезов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6 (специальный выпуск 5). – С. 3-19.

14. Абелев М.Ю., Аверин И.В., Бахронов Р.Р., Коптева О.В. Экспериментальные исследования характеристик деформируемости грунтов в лабораторных и полевых условиях // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 4. – С. 28–32.

15. Ермакова И.А., Бахаева С.П., Дягилева А.В. Численное моделирование геомеханического состояния отвала на водонасыщенном

основании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (104). – С. 11–15.

16. Бондарик Г.К., Иерусалимская Е.Н., Ярг Л.А. Теоретические основы и принципы организации мониторинга геологической среды природно-технических систем регионального уровня // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2009. – № 3. – С. 45–50.

17. Кутепов Ю.И., Васильева А.Д. Инженерно-геологические условия внешнего отвалообразования на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10. – С. 122–131.

18. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Круподеров В.С. Инженерно-геологическое обеспечение формирования и последующего использования отвальных массивов на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S1. – С. 20–35.

19. Жариков В.П. Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обоснование эксплуатации и рекультивации гидроотвалов вскрышных пород Центрального Кузбасса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Жариков В.П. – М., 2005. – 17 с.

20. Иванов И.П., Поспехов Г.Б. Инженерно-геологическая типизация карьерных полей, подлежащих рекультивации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 5. – С. 76–82.

21. Гальперин А.М., Кириченко Ю.В., Ермолов В.А., Кутепов Ю.И. Инженерно-геологическое обеспечение экологически безопасного освоения горнопромышленных природно-техногенных систем // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – № 6. – С. 520–526.

22. Киянец А.В. Инженерно-геологическое обоснование мероприятий по управлению устойчивостью бортов в песчано-глинистых отложениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.15 / Киянец А.В. – М., 1990. – 23 с.

23. Баклашов И.В., Коликов К.С., Бокарев Л.Р. Геомеханическое обоснование заложений полевой выработки для обеспечения эффективной

дегазации пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. № S13. – С. 57-65.

24. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Саркисян А.Х. Изучение инженерно-геологических условий гидроотвалов Кузбасса на различных этапах существования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 5. – С. 145–149.

25. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 1 : Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. – М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 84 с.

26. Гальперин А.М., Мосейкин В.В., Пуневский С.А., Семенова Е.А. Проблемы геомеханики и инженерной геологии в техногенных массивах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S1. – С. 5–13.

27. Кириченко Ю.В., Щекина М.В. Обеспечение достоверности изысканий при инженерно-геологических исследованиях техногенных массивов // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2006. – № 12. – С. 175–181.

28. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д., Мухина А.С. Инженерно-геологические и экологические проблемы при эксплуатации и рекультивации высоких отвалов на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 164–178.

29. Ермаков И.И., Пустовойтова Т.К., Гурин А.Н., Ермаков О.И. Обеспечение устойчивости бортов карьера на месторождении алмазов им. М.В. Ломоносова // Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 73–77.

30. Терцаги К. Теория механики грунтов / Пер. с нем. инж. И.С. Утевского; Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР проф. Н.А. Цытовича. — Москва : Гостройиздат, 1961. — с. 507

31. Панюков П.Н. Инженерная геология. – 2-е изд. – М. : Недра, 1978. – 296 с.

32. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по

специальности 130302 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» направления 130300 «Прикладная геология». – М. : КДУ, 2009. – 349 с.

33. Попов В.Н., Никифоров С.Э., Красножен И.В. Оценка устойчивости откосов глубоких карьеров в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 7. – С. 64–66.

34. Гальперин А.М., Панфилов А.Ю., Пуневский С.А., Жилин С.Н. Инженерно-геологическое и геомеханическое обеспечение формирования отвальных насыпей на намывных основаниях // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2007. – № 5. – С. 396–403.

35. Решетняк С.П., Билин А.Л. Методологические подходы к определению границ карьеров с учетом ценности полезных ископаемых и трехмерности карьерных пространств // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 7. – С. 220–226.

36. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Технология и комплексная механизация открытой разработки месторождений полезных ископаемых». – 5-е изд. – М., 2010. – (Серия «Классика инженерной мысли (КИМ): горное дело»). – ISBN 978-5-397-01330-7.

37. Щадов В.М., Багрова Г.И., Пастихин Д.В. Моделирование развития горных работ на угольном разрезе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 1. – С. 73–77.

38. Семенов В.В., Казанский А.Ю., Банников Е.А. Изучение анизотропии горных пород на керне и ее ориентация в пространстве палеомагнитным методом // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 1. – С. 18–23.

39. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Сергина Е.В. Изменение напряженного состояния и физико-механических свойств намывных пород при формировании горных природно-технических систем // Сергеевские чтения : материалы конференции. – М., 2014. – С. 434–437.

40. Дунаев В.А., Серый С.С. Сочетание горнопромышленной геологии и геоинформатики — веление времени // Горный журнал. – 2004. – № 10. – С. 17–21.
41. Томаков П.И., Коваленко В.С. Вовлечение в производство ресурса выработанного пространства — основное направление в снижении ресурсоемкости и улучшении экологических показателей угледобычи на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1998. – № 3. – С. 37–44.
42. Флорин В.А. Системы геотехнического мониторинга. Вопросы и решения // Приборы. – 2013. – № 7 (157). – С. 13–18.
43. Рекомендации по расчету свайных фундаментов в слабых грунтах / под ред. Б.Л. Фаянса, И.З. Гольдфельда. – М. : Стройиздат, 1975. – 35 с.
44. Цытович Н.А., Кроник Я. А. Interrelationship of the principal physicommechanical and thermophysical properties of coarse-grained frozen soils // Engineering Geology. – 1979. – Vol. 13, No. 1-4. – P. 163–167.
45. Ческидов В.В. Разработка комплексной системы инженерно-геологического и гидрогеологического контроля безопасности эксплуатации горнотехнических сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 358–368.
46. Бондарик Г.К., Иерусалимская Е.Н., Ярг Л.А. Теоретические основы и принципы оценки риска геологических процессов в природно-технических системах // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2006. – № 3. – С. 36–38.
47. Arshi An. Reclamation of coalmine overburden dump through environmental friendly method // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2017. – № 24. – P. 371–378.
48. Bell F.G. Engineering geology / Инженерная геология // Elsevier, 2007 – 593 p.
49. Dawson E.M.; Roth W.H., Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction // Geotechnique, 1999. – 49(6). – p. 835-840

50. Derringham E. Computational engineering geology / Вычислительная инженерная геология // Prentice-Hall Inc, 1998. – 337 p
51. Zhang XQ, Zou JX. Research on collaborative control technology of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster in goaf based on dynamic isolation // Fuel. – 2022. – V. 321. – 124123
52. Zhi-hui Zhang, Da Zhang, Xin-kui Xiang, Xin-you Zhu, Xiao-long He. Geology and mineralization of the supergiant Shimensi granitic-type W-Cu-Mo deposit (1.168 Mt) in northern Jiangxi South China // China Geology. – 2022. – №5. – p. 510-527
53. Das B.M. Advanced soil mechanics / Продвинутая механика грунтов // CRC Press, 2019 г. – 734 p.
54. Русский И.И. Отвальное хозяйство карьеров. – М.: Недра, 1971. – 240 с.
55. Мельников Н.Н., Козырев А.А. Принципы и методология мониторинга геологической среды в природно-технических системах при ведении крупномасштабных горных работ // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Апатиты, 2013. – С. 11–30.
56. Мельников Н.В., Винницкий К.Е [и др.]. Теория и практика открытых разработок. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1979. – 636 с.
57. Васильева Н.В., Бойков А.В. Математические методы обработки данных: Методические указания к лабораторным работам – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. – 76 с.
58. Нурок Г.А., Лутовинов А.Г., Шерстюков А.Д. Гидроотвалы на карьерах. – М.: Недра, 1977. – 311 с.
59. Ялтанец И.М., Бакуменко Д.С. Моделирование и оценка технологических рисков при гидромеханизированной разработке обводненных песчаных месторождений // Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 36–40.
60. Демин А.М., Шушкина О.И. Напряженное состояние и устойчивость отвалов в карьерах – М.: Недра, 1978. – 159 с.

61. Демин А.М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов – Москва: Недра, 1973. – 217 с.
62. Шушкина О.И. Исследование устойчивости внутренних бестранспортных отвалов (на примере Талдинского и Томусинского месторождений Кузбасса). Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук, // ИГД им. А. А. Скочинского – 1973 – 15 с.
63. Имансакипова Б.Б., Турсбекова Г.Ж., Турсбеков Н.С., Турабаев Э.Н. Оценка влияния подземных вод на устойчивость отвала // Вестник КРСУ – 2017. – Том 17. – № 5 – С.195-197
64. Абрамян Г.О., Сессорева Е.Н. Анализ способов подсчета запаса на месторождениях цветных металлов при планировании горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 6. – С. 107–108.
65. Гончаренко С.Н., Авдеев А.Б. Разработка проблемноориентированной информационной аналитической системы управления, планирования и оптимизации производственной деятельности горнопромышленного предприятия // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 82–86
66. Агафонов В.В., Абрамов В.А. Моделирование горных работ при оптимизации технологической схемы шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 5–8.
67. Варыгин С.О., Агафонов В.В., Оганесян А.С., Карасев Г.А. Адаптация моделей логического вывода к процедуре синтеза технологических систем горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S11. – С. 31–36.
68. Гончаренко А.Н., Демчишин Ю.В., Галушка Д.П., Гончаренко С.Н. Модели и методы адаптивного выбора управленческих решений на основе системного анализа промышленных рисков горного предприятия // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2013. – № 3. – С. 14–22.

69. Гончаренко С.Н., Ярошук И.В., Ширинкин М.С. Модели и методы выбора структур информационных комплексов горнопромышленного предприятия с учетом факторов риска // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S2. – С. 147–156.

70. Горн Е.В., Куркутов С.А., Агафонов В.В. Логико-информационная модель проектирования технологических систем угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S25. – С. 3–7.

71. Куликова Е.Ю. Обоснование геоэкологической модели объектов подземного строительства на основе критериев технологической надежности и допустимых рисков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – С. 120–124.

72. Федунец Н.И., Зайцева Е.В. Проблема многомерной классификации геоэкологической информации в информационных системах экологического мониторинга горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. – № 4. – С. 28-30.

73. Мельник В.В., Оганесян А.С. Разработка модели формирования эффективной технологической схемы высокопроизводительной угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 12. – С. 72–75.

74. Панкратенко А.Н., Куликова Е.Ю., Перфилов О.В., Федянин О.С., Николаев П.В., Гончаренко А.Н., Гончаренко С.Н., Ярошук И.В., Панкратенко Н.А., Панкратенко Г.А., Якимишин В.Р. Программа для оценки устойчивости массива горных пород вокруг вертикальных горных выработок и расчета толщины бетонной крепи : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666867 / заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Московский государственный горный университет» (RU). – № 2019663353 ; заявл. 25.10.2019 ; зарегистр. 16.12.2019.

75. Татаринев В.Н. Моделирование напряжений и направлений фильтраций подземных вод при выборе участков для подземной изоляции радиоактивных отходов / В.Н. Татаринев, В.Н. Морозов, А.И. Каган // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 6. — С. 243–249. — УДК 622.504. — ISSN 0236-1493.

76. Кузнецов Ю.Н., Стадник Д.А., Стадник Н.М. Повышение качества 3D моделирования угольных месторождений на основе использования теории сплайнов // Горная промышленность. – 2010. – № 6 (94). – С. 56–58.

77. Темкин И.О., Гончаренко А.Н. Проблемы моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов на горнопромышленном предприятии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 4-2 (183). – С. 252–258.

78. Ческидов В.В., Пантюхина Е.А. Техногенные месторождения как объект математического моделирования с использованием кластерного анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № S2. – С. 138–142.

79. Оганесян Н.К., Агафонов В.В., Ютяев А.Е., Беляев В.В. Комплексная оптимизация структурных элементов технологических схем угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 253–259.

80. Беленко В.В. Геоэкологическая оценка застраиваемой (застроенной) территории с применением крупномасштабного экологического картографирования и геоинформационных систем // Естественные и технические науки. – 2010. – № 4 (49). – С. 216-219.

81. Мельник В.В., Стась Г.В., Соловьев Р.А., Соловьев Д.А. Моделирование свода обрушения в твердых глинах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 531–535.

82. Тедикова А.А., Климоchenков М.Д., Мельниченко И.А., Красноцветов М.А., Ус С.С., Кутлыев И.И., Щёкина М.В. История зарождения и развития геоинформатики как науки // Горная промышленность. — 2024. — № 3. — С. 90–99. — ISSN 1609-9192.

83. Чеклар М., Рыбар П., Михок Я., Энгел Я. Экономическая оценка месторождений полезных ископаемых на примерах блочных моделей открытых горных работ // Экономика и управление инновациями

84. Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С. Геоинформационные технологии блочного моделирования для оценки качественных показателей полезных ископаемых в условиях переходных процессов горного производства // Вестник ДВО РАН. — 2021. — № 1. — С. 38—47. DOI: 10.37102/0869-7698-2021\_215\_01\_03.,

85. Маниковский П. М., Васютин Л. А., Сидорова Г. П. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2021. — Т. 27. — № 2. — С. 6—14. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14.]

86. Abramovich A., Stepanov Yu., Janocko Ju. The influence of the coal mining process on the state of the earth's surface in the district of the block // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, article 01051. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401051

87. Babish G. Geostatistics without tears. A practical guide to surface interpolation, geostatistics, variograms and kriging. Regina, Saskatchewan. 2006, 9 p., Pinto F. A. C., Deutsch C. V. Expected uncertainty as a function of the variogram, data spacing, and other factors / Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 37th International Symposium APCOM 2015. 2015, pp. 1149— 1161

88. Абрамян Г.О., Абрамян А.Г. О свойствах бинарных функций переходных вероятностей (в приложении к геометрии недр) // Маркшейдерский вестник. 2019. № 3 (130). С. 57-60.

89. Агафонов В.В., Оганесян А.С., Снигирев В.А. Обоснование функциональной структуры цифровой угольной шахты // Горный информационно- аналитический бюллетень. — 2020. — No 12 (специальный выпуск 48). — С. 17–22. DOI: 0.25018/0236-1493-2020-12-48-17-22

90. Ческидов В.В., Яницкий Е.Б. Анализ информационных систем в горнодобывающей отрасли // Золото и технологии. – 2021. – № 3.

91. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» : приказ Ростехнадзора от

13.11.2020 № 439 // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: [22.03.2025]).

92. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Геоинформационные технологии блочного моделирования для оценки качественных показателей полезных ископаемых в условиях переходных процессов горного производства // Вестник ДВО РАН. 2021. №1 (215).

93. Г.П. Сидорова, П.М. Маниковский. Прогнозирование качества угля с применением блочной модели пласта (на примере Кутинского бурого угольного месторождения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №12. – С. 55–66. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_55.]

94. Воропаев В.И. Блочное моделирование и проблемы использования его результатов в работе ФГУ ГКЗ / В.И. Воропаев, П.И. Кушнарев // Разведка и охрана недр. — 2006. — № 1 (1). — С. 75-77.

95. Бабелло В.А. Развитие методов оценки физико-механических свойств горных пород в массиве для геомеханического обеспечения открытой угледобычи : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.20 / Бабелло В.А. – М., 2010. – 297 с.

96. Костюков Е.В., Простов С.М., Бахаева С.П. Экспериментально-аналитическое исследование геомеханического состояния техногенного массива гидроотвала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 6-2 (58). – С. 24–28.

97. Гальперин А.М., Панфилов А.Ю., Пуневский С.А., Пелагеин И.В. Гидрогеомеханический мониторинг намывных сооружений горных предприятий // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 19–24.

98. Жабко А.В. Фундаментальные проблемы практической геомеханики и возможные пути их преодоления // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 4 (52). – С. 98–107.

99. Загоруйко, Л. П. Повышение устойчивости отвалов с помощью технологии открытых горных работ Текст. / Л. П. Загоруйко. К.:УКРНИИНТИ,1969. - 68 с.

100. Иванов И.П. Инженерная геодинамика / И. П. Иванов, Ю. Б. Тржцинский – СПб: Наука, 2001. – 416 с.
101. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кириченко Ю.В., Киянец А.В., Крючков А.В., Круподеров В.С., Мосейкин В.В., Жариков В.П., Семенов В.В., Клапперих Х., Тамашкович Н., Чешлок Х. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях: Монография. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 336 с.
102. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Карасев М.А., Кутепов Ю.Ю. Прогноз формоизменения намывных массивов гидроотвалов при складировании на них отвальных насыпей // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 23–27.
103. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Практика С.В., Мильман Г.Л. Технические средства и методика гидрогеомеханического мониторинга при формировании отвальных насыпей и намыве гидроотвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 1. – С. 48–54.
104. Малюшицкий Ю.Н. Центробежное моделирование насыпей отвалов. — Киев: Науково думка, 1985. — 168 с.
105. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Мосейкин В.В. Гидрогеомеханические аспекты освоения техногенных массивов на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № S1. – С. 18–31.
106. Фисенко Г.Л., Гущин В.В., Красносельский Э.Б. Особенности эксплуатации высоких заснеженных отвалов на горных склонах // Горный журнал. – 1978. – № 1. – С. 25–28.
107. Ческидов В.В. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений // Горная промышленность. – 2017. – № 4 (134). – С. 78.
108. Шпаков П.С., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Долгоносов В.Н., Шпакова М.В. Способ расчета устойчивости карьерных откосов для сложноструктурных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 11. – С. 221–225.

109. Геологический отчет с подсчетом запасов каменного угля в границах лицензии КЕМ 11672 ТЭ и в оптимальном контуре разреза Талдинского каменноугольного месторождения ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез». – ООО «Геоскан», 2015. – 293 с.

110. Лихман А. Геологическая блочная модель как главный актив горного предприятия // Золото и технологии. – 2020. – № 3. – С. 42–46.

111. Ческидов В.В., Красноцветов М. А., Айбек уулу М. Геоинформационный метод моделирования внешних отвалов угольных карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2026. - № 3 (специальный выпуск 10).

112. Мониторинг состояния внешнего отвала «Восточный» в ходе его формирования на филиале АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез» (Талдинское поле) — ООО НПФ «КАРБОН», 2022. — 57 с.

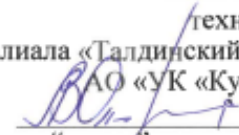
113. Красноцветов М. А. Разработка метода геоинформационного моделирования внешних отвалов угольных карьеров // Новая наука: от идеи к результату. — 2026. — № 3/2026. — С. 7-14. — ISSN 3034-2198.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### А. Акт внедрения результатов диссертационного исследования

 **КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ**  
Талдинский  
угольный разрез

Акционерное общество  
«Угольная компания «Кузбассразрезуголь»  
филиал «Талдинский угольный разрез»

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель директора –  
технический директор  
филиала «Талдинский угольный разрез»  
АО «УК «Кузбассразрезуголь»  
 Ольницкий А.В.  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

#### АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы *Красноцветова Максима Александровича* «Разработка геoinформационного метода моделирования внешних отвалов угольных карьеров», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

#### Комиссия в составе:

**председатель:** *Корнев К.А.* – заместитель технического директора по горным работам филиала «Талдинский угольный разрез»,

**члены комиссии:** *Мартынюк Н.В.* – заместитель главного инженера по горным работам, *Мишукова Е.С.* – главный маркшейдер филиала «Талдинский угольный разрез», *Баданов А.С.* – главный технолог филиала «Талдинский угольный разрез», составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Разработка геoinформационного метода моделирования внешних отвалов угольных карьеров», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности филиалов АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез» при разработке геомеханической модели, согласно ФНиП №439 «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров разрезов и откосов отвалов», на основании геoinформационного моделирования и полученных пространственно-временных изменчивостей техногенных отложений от времени нахождения в отвальном сооружении.

Разработанный метод геoinформационного моделирования позволит использовать его как инструмент для мониторинга, визуализации данных по параметрам, характеризующих устойчивость техногенного массива, обработки и структурированного накопления информации, получаемой на предприятии, а также как геoinформационное обеспечение при принятии управленческих решений по отвалообразованию.

Председатель комиссии

Члены комиссии:



Корнев К.А.

Мартынюк Н.В.

Мишукова Е.С.

Баданов А.С.