

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

Красноцветов Максим Александрович

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ**

Специальность 1.6.20
«Геоинформатика, картография»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент Ческидов Василий Владимирович

Москва, 2026

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.

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. 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.

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 Международной научно-практической конференции «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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современных методов построения геоинформационных моделей массивов горных пород, а также общих тенденций в области складирования вскрышных пород при открытом способе добычи полезных ископаемых, отдельно рассмотрены перспективы и преимущества, используемых на сегодняшний день геоинформационных технологий.

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. Геоинформационное моделирование 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 блочных моделей породных массивов, а также приводятся практические примеры и алгоритмы работы.

Геологическое моделирование или геомоделирование позволяет создавать цифровые модели, основываясь на информации о структуре дневной поверхности земной коры на основе геодезических изысканий, а также о геологическом строении, данные о котором получены при исследованиях сделанных непосредственно с поверхности или под землей. Геомоделирование включает в себя различные аспекты такие как сбор, анализ и управление цифровой информации. Развитием данной области науки занимаются такие ученые как: 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., Якимишин В.Р., Ярощук И.В..

Инженерно-геологическое обеспечение складирования вскрышных пород, а также вопросы, затрагивающие обеспечение устойчивости откосных сооружений, поднимали многие российские специалисты. Наиболее ощутимый вклад в данное направление внесли: Васильева А.Д., Гальперин А.М., Кириченко Ю.В., Коликов К.С., Кутепов Ю.И., Кутепов Ю.Ю., Кутепова Н.А., Липина А.В., МIRONENKO В.А., Мосейкин В.В., Пастихин Д.В., Пустовойтова Т.К., Решетняк С.П., Ржевский В.В., Сергина Е.В., Ческидов В.В., Шешко Е.Ф., Шпаков П.С..

Исследования перечисленных выше авторов легли в основу современной теории и практики проектирования и формирования отвальных массивов, а также разработки подходов по управлению их состоянием и рациональному природопользованию.

Анализ функционала горно-геологических информационных систем и других типов программного обеспечения показывает возможность и необходимость использования цифрового инструментария для построения моделей откосных сооружений, а также создания новых методов построения геоинформационных моделей таких массивов. В связи с тем, что отвалы формируются на больших площадях, их состав и условия формирования весьма неоднородны, высота сооружения и уровень обводненности различны, что демонстрирует необходимость использования программного обеспечения, позволяющего автоматизировать расчеты, применять каркасное и блочное моделирование, проводить анализ и обработку маркшейдерской информации для своевременного принятия управленческих решений, в том числе для обеспечения промышленной и экологической безопасности.

Использование информационных систем для построения инженерно-геологической модели также позволит создать единую цифровую среду для планирования всего жизненного цикла горнодобывающего предприятия от геологоразведки до формирования отвальных сооружений в процессе эксплуатации месторождения.

Стоит отметить, что в последние годы произошел ряд изменений в нормативно-правовых актах Российской Федерации, в том числе вступившие в силу на основе Приказа 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). В то же время иностранное программное обеспечение на сегодняшний день не адаптировано под требования указанного выше нормативного акта, а российские разработки обладают весьма ограниченным функционалом в данных областях технологий. Это еще раз подчеркивает необходимость и актуальность разработки новых, в том числе геоинформационных подходов по построению

моделей откосных сооружений, включая внешние отвалы угледобывающих предприятий.

Во второй главе описаны последовательность и основные приемы, которые используются при построении геоинформационной модели отвала вскрышных пород на основе принципов блочного моделирования с учетом анализа изменчивости свойств техногенных отложений внешних отвалов угледобывающих предприятий, рассмотрена общая характеристика горно-геологических условий угольных месторождений.

Условия отвалообразования угольных месторождений в значительной степени отличаются от рудных. Среди основных отличий можно выделить большой объем складироваемых вскрышных пород и особенности их физико-механических свойств. На угольных карьерах формируются значительные объемы вскрышных пород, а отсутствие площадей под отвалообразование приводит к формированию техногенных сооружений значительной высоты, занимающие минимальные площади. В свою очередь на рудных месторождениях, как правило, для добычи одной тонны полезного ископаемого необходимо извлечь гораздо меньший объем вскрышной породы, так как прочные магматические и метаморфические породы позволяют формировать конечный контур отработки с более крутыми углами уступов и бортов, нежели осадочные породы, представленные на угольных месторождениях. В целом, породы, представленные на угольных месторождениях, характеризуются низкими прочностными свойствами и способностью к размоканию.

Не исключением являются и внешние отвалы, которые формируются на угледобывающих предприятиях Кузбасса. Данный угольный бассейн расположен на территории двух субъектов Российской Федерации: Кемеровской и Новосибирской областей, большая площадь приходится на первую административно-территориальную единицу. Рассматриваемый бассейн является крупнейшим по запасам коксующихся углей в России. Также он входит в число крупнейших угольных бассейнов мира, занимает четвертое место в нашей стране по общим запасам после соответственно Ленского, Тунгусского и Канско-Ачинского.

В районах, где ведется добыча угля открытым способом, можно выделить типовые месторождения, характеризующиеся наиболее представительным литологическим разрезом, что позволяет провести сравнительный анализ и сделать выводы о закономерностях изменения параметров прочности вскрышных пород, поступающих в отвалы. Установлено, что определяющее влияние на прочность раздробленных вскрышных пород в отвале будет оказывать тип цемента, а именно, карбонатный или глинистый. Основными преобладающими сериями вскрышных пород, где осуществляется добыча каменного угля, является балахонская и кольчугинская серия.

Для балахонской серии характерными являются вскрышные породы разрезов

«Кедровский», «Бачатский», «Вахрушевский» с преобладанием карбонатного типа цемента, который на стадии вторичных преобразований углевмещающей толщи активно замещал полевые шпаты, что привело к дополнительным спайкам между первичным цементом и минеральными обломками и, соответственно, значительному повышению прочности пород, которая сохраняется в обломках при поступлении в отвал.

Породы кольчугинской серии с разрезов «Заречный», «Талдинский», «Моховский», «Кыргайский Средний» находятся на более низкой стадии катагенетических изменений, в них слабо проявляются вторичные изменения. Учитывая площадное распространение, можно утверждать, что преимущественно породы данной серии включают глинистый цемент, представленным гидромусковитом, с проявлениями серицита и карбонатов, соответствующих стадии метаморфизма углей Д и выше. Тип цемента в данных породах, как правило, пленочный.

При планировании разработки месторождений твердых полезных ископаемых с целью их рационального использования большое значение имеет комплексная оценка и геометризация не только рудных или пластовых тел, 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 и др. С их помощью предлагается решать задачи, не только связанные с отработкой месторождения полезного ископаемого, а также с созданием геометрической модели отвального сооружения, которая служит основой для решения многих задач, в том числе, выявление ослабленных зон, расчет коэффициента запаса устойчивости, определение интенсивности отсыпки и др. В соответствии с пунктом 19 ФНиП, утвержденных Приказом Ростехнадзора № 439: «По результатам инженерно-геологического изучения массива горных пород для объектов с объемом разработки горной массы 1 миллион кубических метров и более и при комбинированном способе ведения горных работ составляется геомеханическая модель месторождения (участка недр)», появляется необходимость в создании единого цифрового комплекса для осуществления геологического и маркшейдерского контроля на всех этапах производства.

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 инженерно-геологических 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.

Основными преимуществами блочного моделирования можно выделить:

- визуализация большого объема информации в трехмерном пространстве;
- многовариантность статистического и геостатистического анализа и оценки качественных показателей (угол внутреннего трения, сцепление, плотность, пределы прочности на сжатие и растяжение, обводненность и т.д.);
- автоматизация расчетов при обосновании параметров отвалов;
- ведения и использования базы данных инженерно-геологических изысканий для проектирования отвального сооружения;
- широкое распространение вычислительной техники, развитие и ценовая доступность компьютерных технологий.

При построении геоинформационных моделей отвалов одним из ключевых принципов является принцип «этапности». По аналогии с алгоритмом моделирования рудных месторождений на первом этапе геоинформационного моделирования техногенного сооружения создается база данных инженерно-геологических скважин. Необходимо выделить интервалы опробования по результатам инженерно-геологических изысканий (ИГИ) вдоль осей скважин. Для этого используем данные буровых журналов и лабораторных исследований. Также осуществляется визуализация точек бороздowego опробования при их наличии, полученные в результате обработки протоколов лабораторных испытаний и получения показателя сцепления и угла внутреннего трения.

На втором этапе необходимо создать каркас поверхностей на основании данных топографической или аэрофотосъемки.

Третий этап — построение замкнутых солидов отсыпки отвальной массы по годам. Этот этап необходим для дальнейшего присвоения элементам блочной модели значений времени формирования. При построении замкнутых каркасов может возникать ошибка, связанная с пересечением поверхностей, используемых для создания замкнутого солида. Данная ошибка чаще всего возникает в зонах, где отвальные работы не производились, а цифровые модели поверхности накладываются друг на друга из особенностей или погрешностей, формируемых при осуществлении аэрофотосъемки, что вызывает эффект пересечения. На этом этапе необходимо вручную выявлять зоны пересечения и исключать их путем использования булевых операций над каркасами, которые встроены почти во все современные горно-геологические информационные системы.

Четвертый этап – выбор значений материнского блока путем оценки технологических паспортов отвалообразования, принятых на предприятии. Размеры материнского блока целесообразнее принимать в два раза меньше высоты яруса отвала для сохранения баланса

между точностью построения и скоростью обработки данных и работы с моделью.

На пятом этапе для построения пустой блочной модели по годам отсыпки, элементам блочной модели должны быть присвоены значения, соответствующие годам формирования отвального сооружения (рисунок 1). Данный этап подразумевает использование метода субблокирования для разделения блока на границы отсыпки по двум различным годам по оси Z. Для этого используется метод субблокирования - это функция, применяемая для повышения точности моделирования контактов между различными геологическими или геолого-технологическими объектами. Стандартная регулярная сетка блоков (родительских блоков) часто имеет грубые границы, которые неточно отображают сложную форму годовой отсыпки.

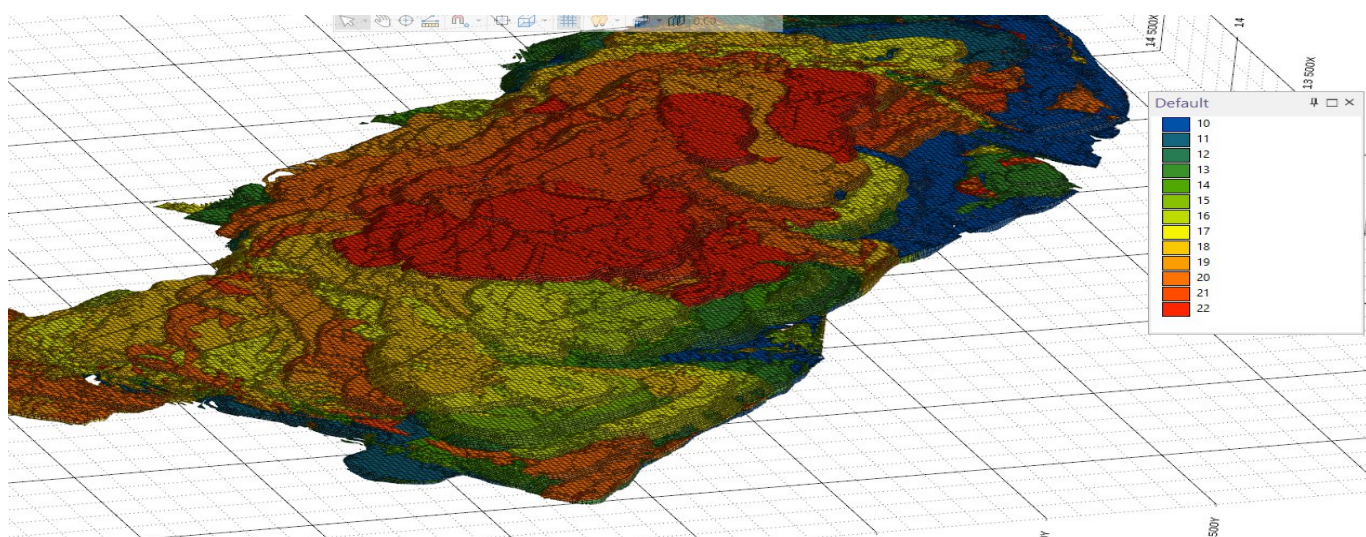


Рисунок 1 – Результат районирования отвала по времени отсыпки

Таким образом, создание геоинформационной модели отвального сооружения позволяет собрать значительный объем различных изысканий (инженерно-геологических, инженерно-геодезических, гидрогеологических и т.д.), данных аэрофотосъемок и мониторинга состояния техногенного объекта, а также визуализировать его с получением блочной модели, сформированной по годам отсыпки, тем самым формируя единую среду для хранения разнородных данных – принцип «комплектности».

В третьей главе на основании анализа набора показателей вещественного состава, физических свойств техногенных отложений отвалов угольных разрезов и периода нахождения в нем пород установлено, что характеристики массива изменяются: сцепление со временем нахождения в массиве увеличивается по экспоненциальной функции, а угол внутреннего трения закономерно уменьшается, согласно линейной функции.

Для анализа фактических свойств техногенных отложений внешних отвалов были рассмотрены результаты инженерно-геологических изысканий, выполненных на внешнем отвале «Восточный», породы которого относятся к кольчугинской серии, что характеризует данный техногенный массив как характерный для угледобывающих предприятий юга Кузнецкого

бассейна. На данном внешнем отвале было пройдено восемь скважин, секущих тело насыпи на всю мощность. Также был осуществлен отбор проб с поверхности на основании районирования, выполненного с учетом времени складирования вскрышных пород. Всего было отобрано 60 бороздовых проб.

Стоит отметить, что с использованием геоинформационных систем была возможность определить 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 воды и изменением температуры, то для получения наиболее полной информации о свойствах пород опробование планировалось с учетом срока, в течение которого отложения находятся в теле отвала. Для реализации данного подхода использовался принцип «дискретности» - наполнение элементов модели атрибутами, характеризующими временной интервал отсыпки отвала (рисунок 2).

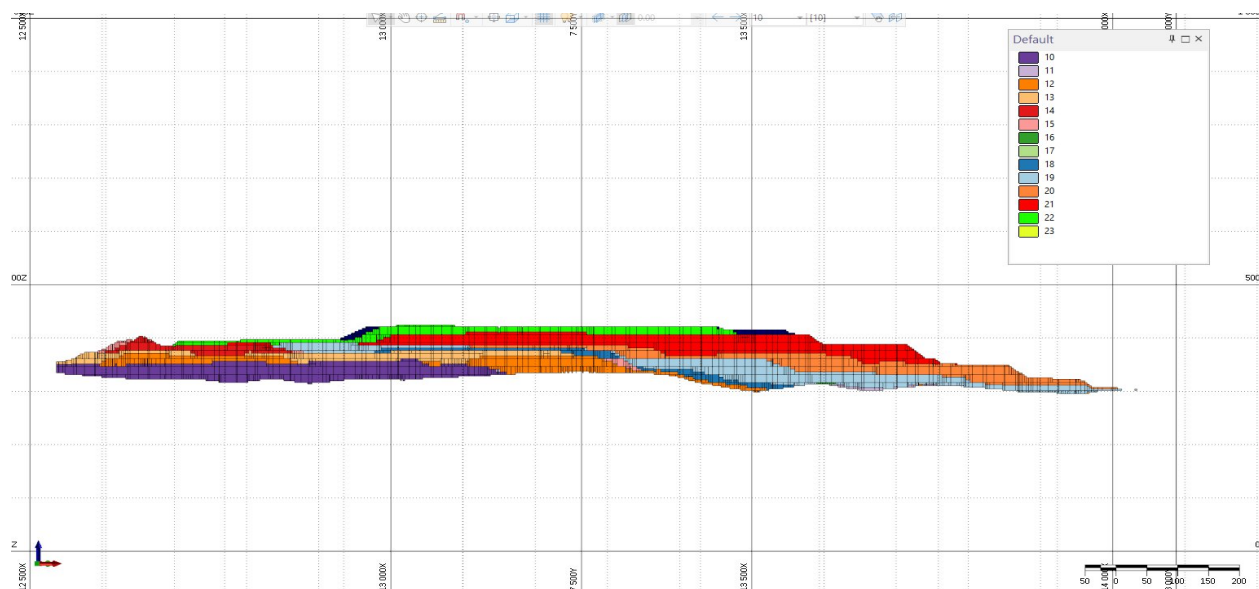


Рисунок 2 – Сечение геоинформационной модели, сформированной по годам отсыпки

На рассматриваемом отвале пробы отбирались в зависимости от соотношения уложенных в массив коренных пород и суглинки. Далее 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 предела прочности на сдвиг. В результате статистической обработки данных, полученных в ходе лабораторного изучения параметров прочности углеватствующих пород кольчугинской серий были получены значения сцепления (C) и угла внутреннего трения (ϕ).

Исходя из информации, полученной из геоинформационной модели о времени

формирования отобранных проб, с учетом деления на определенные типы соотношения глинистого заполнителя и полученных данных сцепления и угла внутреннего трения были получены математические зависимости, которые характеризуют рассматриваемый внешний отвал угольного разреза, примеры которых продемонстрированы на рисунке 3.

Анализ полученных результатов статистической обработки зависимостей показал:

1. параметры прочности отвальных смесей определяются соотношением скального обломочного материала и глинистого наполнителя из неоген-четвертичных отложений, полученные результаты подтвердили установленные зависимости, независимо от степени литификации и состава пород;

2. прочностные свойства пород изменяются от времени нахождения в отвальном сооружении, независимо от соотношения глинистого материала в смеси;

3. полученные математические зависимости показали, что сцепление от времени изменяется по экспоненциальной функции, а угол внутреннего трения по линейной возрастающей функции.

Нужно отметить, что при оценке устойчивости отвальной насыпи в текущих нормативно-правовых документах не учитывается изменение физико-механических свойств пород в результате их выветривания под действием внешних факторов (в первую очередь атмосферных осадков и изменения температуры). Вскрышные породы кольчугинской серии в поверхностных условиях быстро разрушаются до состояния щебенистых суглинков и щебенистых отложений с суглинистым и супесчаным заполнителем, как отмечалось неоднократно выше, что может привести к формированию зон ослабления.

Для перехода к этапу интерполяции исходных данных в элементы блочной модели и визуализации распределения свойств в рамках созданной геоинформационной модели необходима реализация ее дискретной вычислительной основы. В горно-геологических информационных системах для интерполяции значений могут применяться следующие методы: метод обратных взвешенных расстояний, кригинг (простой, ординарный, с трендом), ранговый и полииндикаторный кригинг. Выбор оптимального алгоритма интерполяции становится ключевым для обеспечения адекватности итоговой модели.

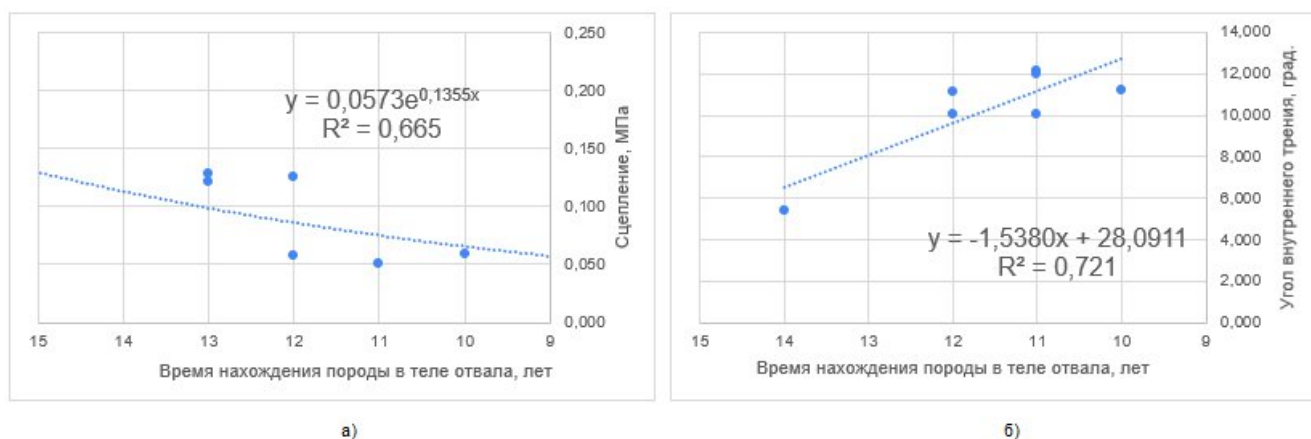


Рисунок 3 – Пример выведенных зависимостей показателя сцепления и угла внутреннего трения от времени нахождения в техногенном массиве для разного соотношения содержания глинистых и полускальных отложений: а – для сцепления с содержанием глинистых пород 40-50%; б – для угла внутреннего трения с содержанием глинистых пород 60-80%.

Интерполяцию данных при построении геоинформационной модели отвала рекомендуется выполнять методом обратных взвешенных расстояний с параметрами эллипса, которые можно определить на основе карты полувариограмм. Для рассматриваемого примера установлено, что в северо-западном и юго-восточном направлении отмечается меньшая изменчивость, а соответственно ось эллипса более вытянутая, чем в направлении с северо-востока на юго-запад (рисунок 4). Так, например, выявленные направления изменчивости содержания глинистого заполнителя связано, в первую очередь, с технологическими особенностями отсыпки техногенного массива. Начиная с момента формирования сооружения, отвалообразование происходило в направлениях на северо-запад и юго-восток. А также такая изменчивость может складываться и из-за природных факторов, так как породный внешний отвал вытянут в вышеописанных направлениях, то в направлениях северо-востока и юго-запада отвал имеет меньший размер, что характеризует проявление процессов приповерхностного выветривания, и как следствие, наибольшую изменчивость содержания глинистого заполнителя.

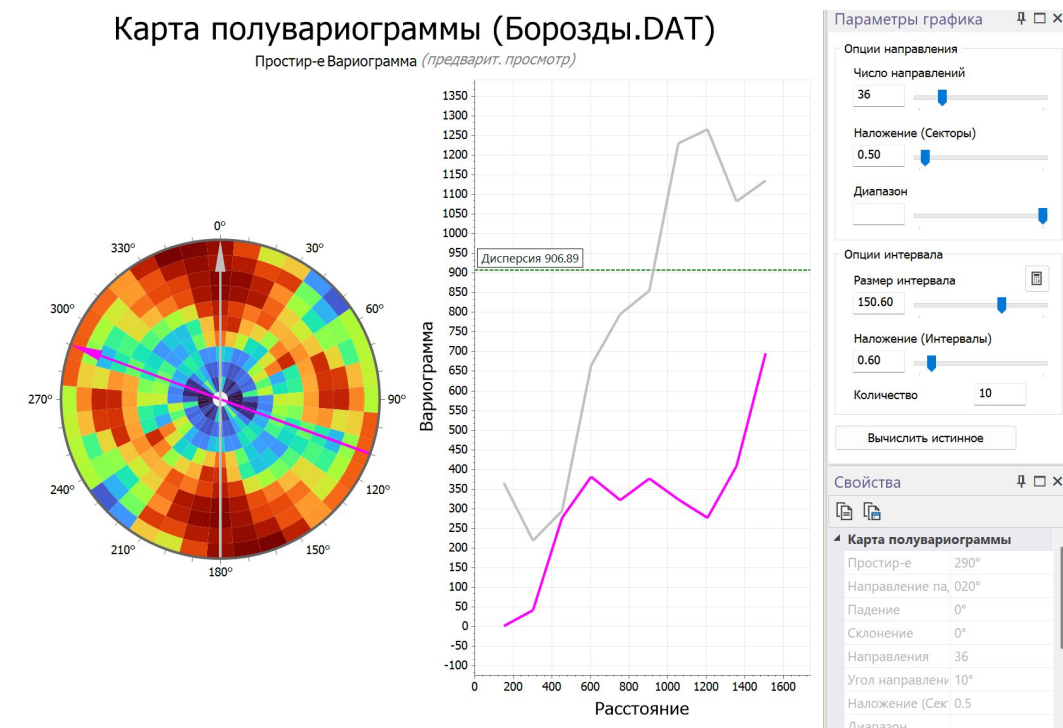


Рисунок 4 – Карта полувариограмм, основанная на данных соотношения суглинистого заполнителя и коренных пород

Результатом оценки по показателю распределения содержания суглинков в массиве явилась созданная геоинформационная модель, позволяющая оценить количество содержания суглинков в блоке (рисунок 5). По результатам интерполяции данных о соотношении содержания суглинка и коренной породы в элементы блочной модели была проведена визуализации в трехмерном пространстве горно-геологической системы для возможности более наглядной оценки работы геостатистического метода. Анализируя полученную геоинформационную модель, можно констатировать, что отображенные зоны с высокими содержаниями суглинка в цифровой модели демонстрирует удовлетворительную сходимость с реальным объектом исследования, так как на данный момент времени в северо-западной части наблюдается деформационные процессы, что привело к приостановке отвалообразования в этом направлении и ведению инструментального мониторинга на объекте.

Следующим этапом в построении геоинформационной модели и наполнения ее физико-механическими параметрами является получение для каждого элемента блочной модели значения сцепления и угла внутреннего трения с учетом двух параметров: времени его отсыпки в отвальное сооружение и соотношение глинистого заполнителя и коренной породы отложений отвального сооружения. Благодаря построенным ранее каркасным моделям по годам формирования внешнего отвала и оцененной по содержанию глинистого заполнителя геоинформационной модели с использованием полученных в результате статистической обработки формул (таблица 1), можно произвести расчет для каждой составляющей блочной

модели значений сцепления и угла внутреннего трения с учетом пространственно-временной изменчивости.

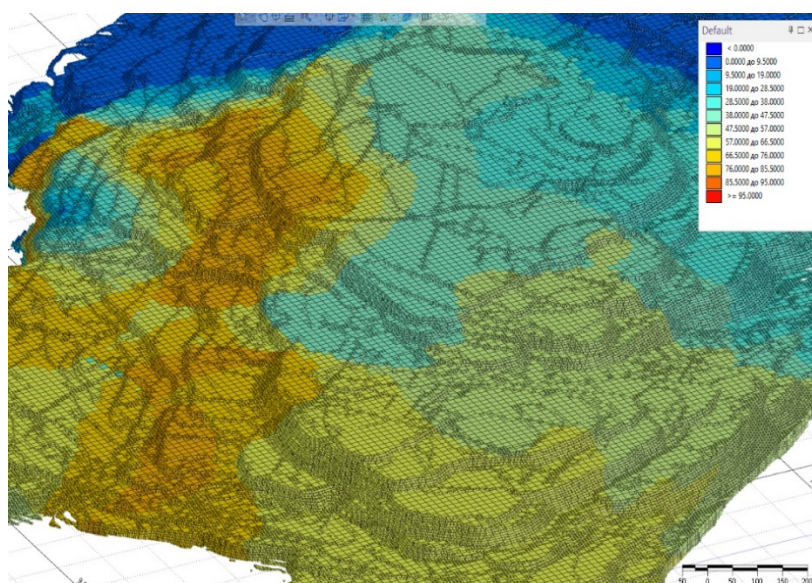


Рисунок 5 – Интерполированная данными содержания глинистого заполнителя в элементы блочной модели, отображенная в трехмерном виде геоинформационная модель

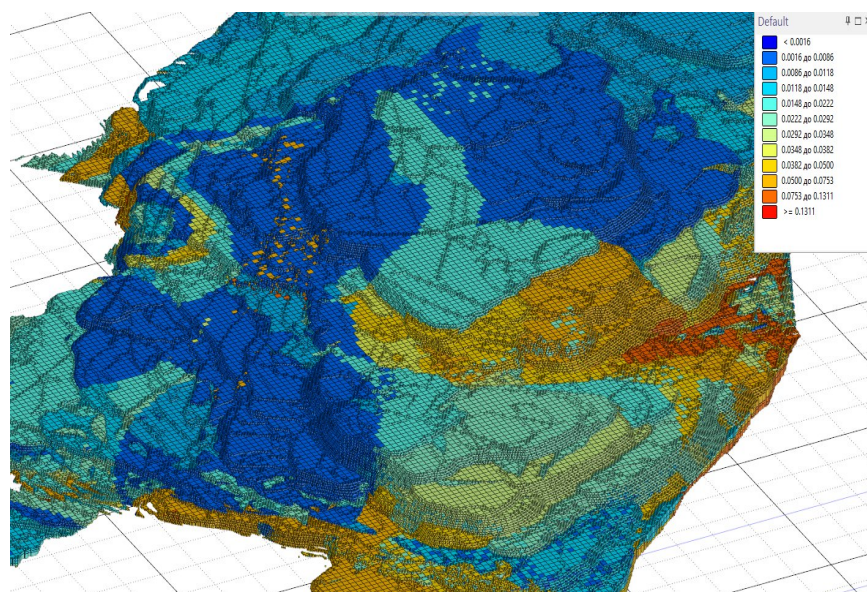
Таблица 1. Используемые математические формулы для получения значения сцепления и угла внутреннего трения, рассматриваемого объекта

Содержания глинистого заполнителя	Сцепление		Угол внутреннего трения	
	$y = a * e^{(b * x)}$		$y = kx + m$	
	a	b	k	m
0	0,0573	0,1355	-0,6526	33,7424
0-30	0,0049	0,2155	-1,7347	38,3107
30-40	0,0012	0,3004	-2,5955	50,0431
40-50	0,0168	0,1363	-0,8730	20,4116
50-60	0,0062	0,1822	-1,3147	27,2404
60-80	0,0011	0,3192	-1,5380	28,0911
80-100	0,0491	0,0702	-0,5066	12,5563

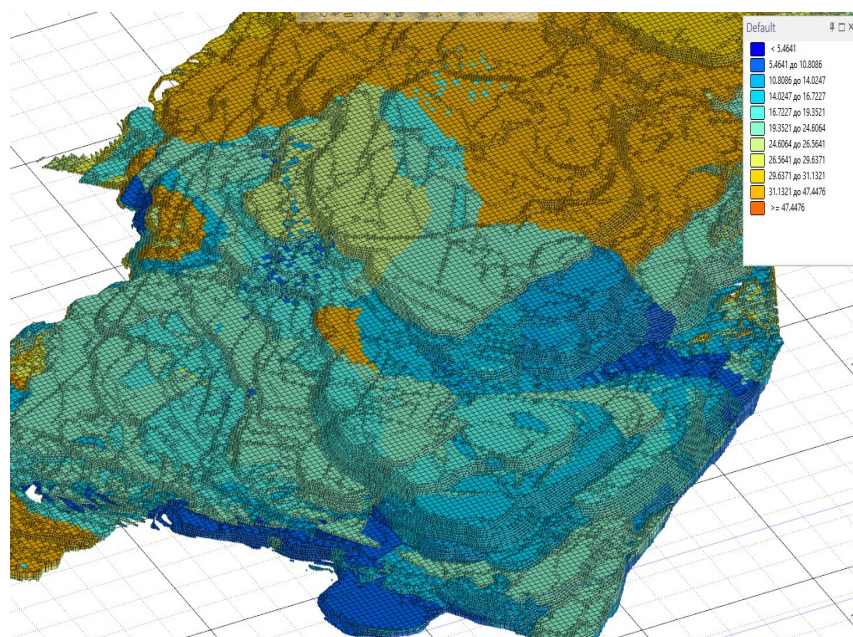
С использованием возможностей горно-геологических информационных систем, а точнее математического модуля программы, были рассчитаны значения прочностных характеристик для каждого элемента блочной модели (783 233 блоков).

После проведения вычислительных операций в программном обеспечении данная модель была визуализирована (рисунок 6). Как видно на рисунке 6 в северо-западной части прочностные свойства минимальны, это связано с технологией формирования отвального сооружения, распределением литологических разностей отсыпаемых горных пород, а также интенсивности отвалообразования и влияния природных факторов на изменчивость массива (выветривание). Для заверки данных геоинформационной модели использовался принцип

«верификации» - на основе экспертных заключений, выполненных специализированной организацией для оценки устойчивости отвального сооружения. Геоинформационная модель показала сходство с экспертным заключением в части выявления зон с относительно низкими физико-механическими свойствам техногенных отложений.



а)



б)

Рисунок 6 – Визуализация распределения физико-механических параметров в геоинформационной модели с учетом пространственно-временной изменчивости:

а – сцепление, б – угол внутреннего трения

Таким образом на основании выявленных зависимостей и принципов блочного моделирования построена геоинформационная модель с учетом распределения соотношений

содержания глинистого заполнителя и коренных пород, а также пространственно-временной изменчивости физико-механических параметров, характеризующих отложения внешних отвалов угольных карьеров.

Четвертая глава включает в себя результаты натурного гидрогеологического обследования отвала «Восточный», прогноз изменения состояния внешних отвалов с учетом результатов геоинформационного моделирования и изменения гидрогеологических условий, а также представлена структура геоинформационного моделирования и выданы рекомендации по ее использованию.

Увеличение высоты отвальных сооружений приводит к изменению напряженного состояния пород под действием нагрузки от веса вышележащего материала. При возрастании нормальной нагрузки уплотнения изменяются гранулометрический состав отвальных пород, их физико-механические и водно-фильтрационные свойства. В частности, снижение проницаемости и пористости способствует при наличии инфильтрационного питания формированию в техногенном массиве водоносного горизонта, охватывающего значительную его часть. При этом в откосных частях отвала появляются дополнительные силы, снижающие коэффициент запаса устойчивости, а именно: гидростатическое взвешивание и гидродинамическое давление. В связи с этим, обоснованию устойчивости высоких отвала должны предшествовать прогнозы режима подземных вод в формируемых техногенных массивах.

По данным бурения на отвале «Восточный» в 2022 году на участке в скважинах 3-20 и 2-20 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 для «Восточного» отвала Талдинского угольного разреза, 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.

Для построения трехмерной поверхности техногенного водоносного горизонта были использованы данные, полученные в результате мониторинга, анализа аэрофотосъемок, а также в результате натурных обследований.

Данные были обработаны, подготовлены и визуализированы в программном обеспечении Micromine в виде базы данных точек для построения цифровой модели поверхности техногенного водоносного горизонта (рисунок 7).

соответствует реальности. Алгоритм минимальной кривизны устраняет этот недостаток, сглаживая поверхность, устраняя резкие перегибы и придавая ей естественный, плавный вид.

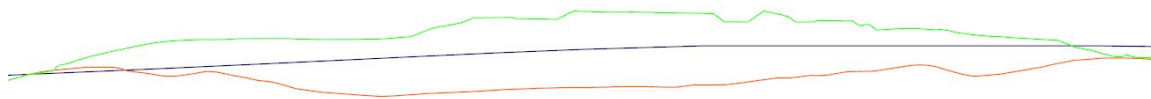


Рисунок 8 – Визуализация уровня техногенного водоносного горизонта в теле отвала, отображенная в сечении. Цветами обозначены: зеленым – поверхность отвала, синим – поверхность техногенного водоносного горизонта, оранжевым – основание техногенного сооружения и естественный рельеф.

Геоинформационная модель позволяет с учетом полученных зависимостей осуществить прогнозирование распределения показателей физико-механических свойств в породном отвале угольного карьера, необходимых для оценки его устойчивости. В основе такого прогноза лежит один из принципов, описанных выше – учет пространственно-временной изменчивости прочностных свойств отвала.

Исходными данными для прогнозирования параметров техногенного массива служат данные проектного контура отсыпки отвала по годам, информация о литологическом составе отсыпаемых пород. Поскольку суглинки и коренные породы кардинально различаются по своим свойствам (плотности, сцеплению, углу внутреннего трения, водопроницаемости), их пространственное распределение предопределяет картину физико-механических характеристик. На эту исходную геометрическую и литологическую модель накладываются полученные формулы, описывающие пространственно-временную изменчивость характеристик, в частности, сцепления и угла внутреннего трения. Эти зависимости учитывают процессы, происходящие после отсыпки: уплотнение, выветривание, что приводит к изменению прочностных свойств во времени.

Построенная геоинформационная модель позволяет заблаговременно идентифицировать потенциально слабые участки. Такой подход управления отвальным сооружением дает возможность оптимизировать график отсыпки, планировать упрочняющие мероприятия и разрабатывать эффективную систему мониторинга с установкой датчиков в наиболее критических зонах.

Структура геоинформационной модели (рисунок 9) представляет собой многоуровневый алгоритм анализа данных (результаты инженерно-геологических, гидрогеологических,

инженерно-геодезических изысканий и т.д.) в комплексе с использованием горно-геологических информационных систем для преобразования собранной и обработанной информации при помощи методов блочного и каркасного моделирования. Геоинформационная модель является платформой для хранения и управления данными, а также информационным обеспечением процессов анализа параметров и характеристик техногенного массива, проектирования внешних отвалов, развития систем мониторинга, прогнозирования критических рисков, формирование отчетов о состоянии техногенного массива и принятия тактических управленческих решений по отвалообразованию

Проведенный комплекс работ позволил сформировать следующие рекомендации при внедрении и работе различных структурных подразделений предприятия, осуществляющего добычу угля открытым способом.

1. Специальной группе по мониторингу вести систематическое пополнение геоинформационной модели актуальными данными аэрофототопографических съемок, с использованием методов, рассмотренных в диссертационном исследовании.

2. Геологическому отделу разработать программу для изучения физико-механических свойств отложений техногенных массивов с учетом появления новых данных, при необходимости актуализировать математические зависимости, в части уточнения аппроксимирующих функций для сцепления и угла внутреннего трения. Производить интерполяцию новых данных в элементы блочной модели для ее актуализации при появлении новой актуальной информации, используя принцип «адаптивности», позволяющий актуализировать параметры с учетом добавления входных данных.

3. Отделу планирования учитывать при проектировании отвального сооружения, выявленные зоны с высокими содержаниями глинистого материала и низкими прочностными характеристиками. При проектировании учитывать возможное уменьшение значений угла внутреннего трения и сцепления со временем, что может негативно повлиять на устойчивость отвала.

4. При разработке и актуализации геомеханической модели, регламентированной Федеральными нормами и правилами Приказ №439, использовать геоинформационную модель для анализа изменения горно-геологических условий и прогнозирования возможных рисков.

5. Службе главного геолога, службе главного маркшейдера по актуализированным данным геоинформационной модели руководствоваться для организации визуальных и инструментальных наблюдений на внешних отвалах угольных карьеров.

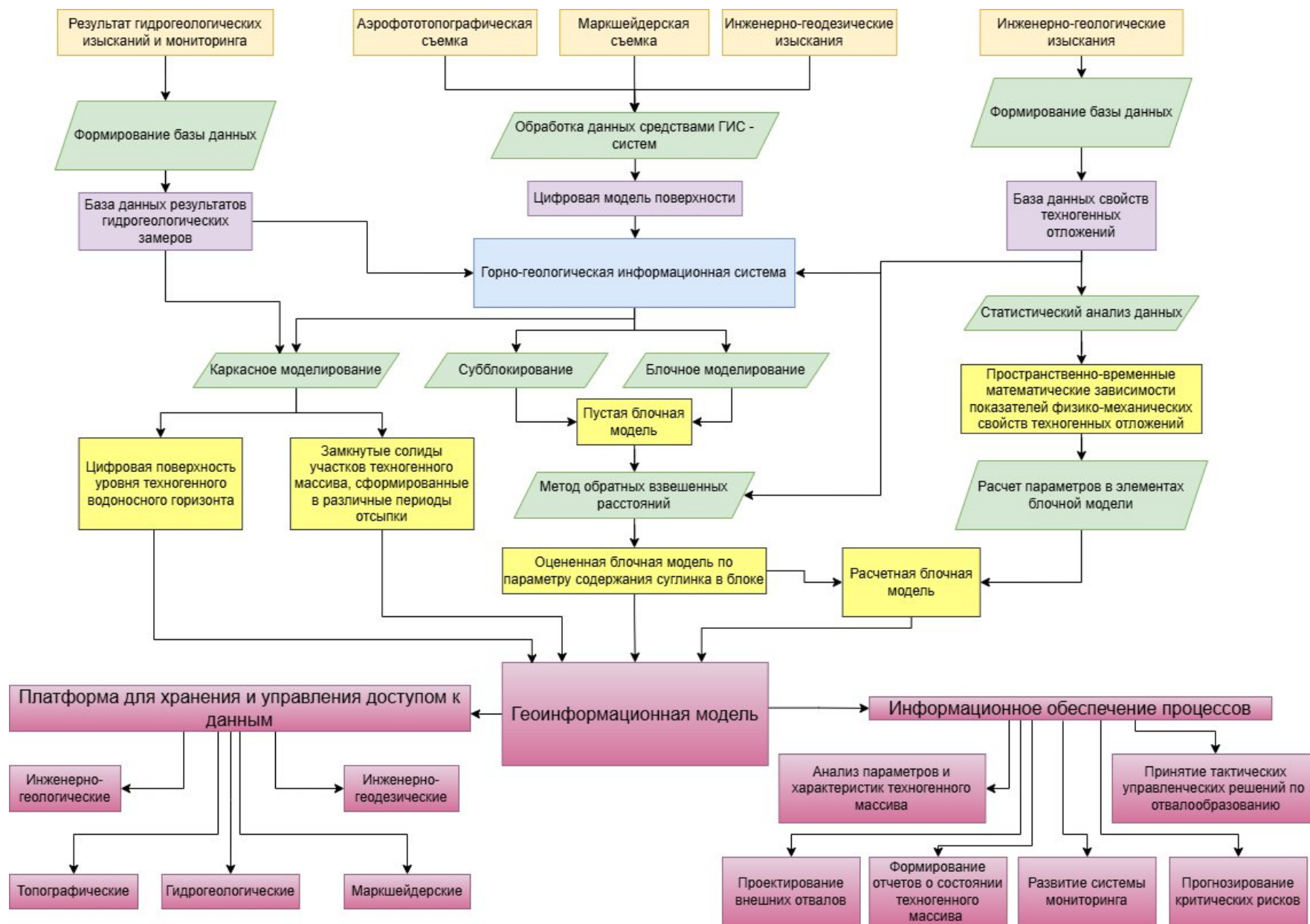


Рисунок 9 – Структура геоинформационной модели

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 Талдинском угольном разрезе.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. 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). 10.25018/0236_1493_2024_3_10_21.

2. 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. 10.25018/0236_1493_2023_6_5_3

3. Тедикова А.А., Климоченков 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.

В прочих изданиях:

1. 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.