

Новокузнецкий институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Кемеровский государственный университет»

На правах рукописи



Бурмин Леонид Николаевич

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
МАРШРУТОВ ЭВАКУАЦИИ  
ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ  
В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Специальность 25.00.35 - Геоинформатика

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
к.т.н., доцент Степанов Ю.А.

Новокузнецк, 2017

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОГО ВЕДЕНИЯ РАБОТ НА ШАХТАХ УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	11
1.1 Травматизм на угольных шахтах.....	11
1.2 Этапы составления плана ликвидации аварий.....	15
1.3 Обзор существующих горных ГИС для угольных шахт.....	23
1.4 Обзор методов определения маршрута.....	35
Выводы по главе.....	42
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ЭВАКУАЦИИ .....	43
2.1 Геоинформационная модель маршрутов эвакуации из угольных шахт..	43
2.2 Пространственно-атрибутивная модель углепородного массива с горными выработками .....	45
2.3 Построение конечно-элементной модели ослабленного массива .....	53
2.4 Нахождение областей опасного напряжения в окрестностях горных выработок.....	63
Выводы по главе.....	67
3 РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМА НАХОЖДЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО МАРШРУТА ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ЭВАКУАЦИИ .....	68
3.1 Описание предлагаемой методики построения модели эвакуации горнорабочих .....	68
3.2 Способ устранения пространственного искажения.....	73
3.3 Алгоритм нахождения маршрута эвакуации.....	76
3.4 Вычисление уровня риска передвижения по маршруту эвакуации.....	80
Выводы по главе.....	82

4 РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ЭВАКУАЦИИ В ВИДЕ КОМПЛЕКСА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ .....	83
4.1 Способ хранения и анализа пространственно-атрибутивных данных ....	83
4.2 Технология построения изоповерхностей для визуализации зон опасного напряжения .....	91
4.3 Структура программного модуля для работы с хранилищем данных ....	97
4.4 Структура программного модуля нахождения безопасного маршрута эвакуации .....	105
4.5 Разработка графического интерфейса для компьютерной программы оперативного нахождения маршрута эвакуации .....	110
4.6 Апробация методики определения маршрутов эвакуации .....	116
Выводы по главе.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126

## **Введение**

### **Актуальность работы**

Угольная промышленность является важной отраслью топливно-энергетического комплекса Российской Федерации: из российских угольных месторождений добывается более 330 млн тонн угля ежегодно [1]. При добыче полезных ископаемых актуальной задачей является обеспечение безопасности горнорабочих при реализации технологических процессов выемки угля.

Основным нормативным документом по обеспечению безопасности ведения горных работ является Инструкция по составлению планов ликвидации аварий (ПЛА) на угольных шахтах, утвержденная постановлением Госгортехнадзора России от 13.12.1994 № 67. ПЛА разрабатывается в соответствии с состоянием горных выработок, планируемым на момент ввода его в действие.

При ведении горных работ в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях периодически происходит накопление и перераспределение потенциальной энергии упругих деформаций угольного пласта и вмещающих пород, что не учитывается при составлении ПЛА. Изменение напряженно-деформированного состояния углепородного массива может приводить к возникновению в окрестностях очистного или проходческого забоя опасных зон с повышенным горным давлением и, далее, к развитию аварийных ситуаций.

На угольных предприятиях разных стран, занимающиеся выемкой полезных ископаемых, по данным международного статистического института, ежегодно происходит до 96 аварийных происшествий. Как минимум 15% аварий (в том числе и в России) являются причиной гибели людей [3,6]. Результаты расследования несчастных случаев свидетельствуют, что до 60% чрезвычайных ситуаций (ЧС) происходит вследствие действий персонала, вызванных ошибочными представлениями о реальной обстановке в горных выработках шахты после возникновения аварии [4]. Это объясняется

тем, что существующее информационное обеспечение не позволяет надежно прогнозировать и своевременно предотвращать возникновение и развитие опасных производственных ситуаций.

Для определения надежного безопасного маршрута эвакуации горнорабочих необходимо учитывать как можно больший набор пространственно-атрибутивных данных, влияющих на оценку риска передвижения по горным выработкам, таких как скорость передвижения людей по аварийной выработке, наличие свежей вентиляционной струи, аэрогазовые условия и уровень напряжения в кровле горных пород и т.п. [5]. При изменении технологии производства, схемы вентиляции, вводе новых и закрытии отработанных участков некоторые пространственно-атрибутивные данные могут изменяться, в связи с чем возникает необходимость в поддержке актуальных данных о геомеханическом состоянии горных пород с использованием горных геоинформационных систем.

Существующие горные геоинформационные системы: зарубежные («Datamine», «GEMCOM», «Vulcan», «Micromine», «Surpac» и другие) и отечественные (ГИС ИНТЕГРО, «Панорама» и др.), успешно справляются с задачей интерполяции геологических данных для геомоделирования горного массива. Однако в данных системах отсутствует возможность определения безопасного пути спасения работников. Некоторые информационные системы частично решают задачу определения безопасного маршрута эвакуации людей из угольных шахт за счет контроля позиционирования персонала в горных выработках: «Талнах-координата», «Геодинамический полигон», UGPS. Однако эти системы не позволяют определить уровень риска передвижения по горным выработкам, в связи с чем, невозможно определить безопасные маршруты для эвакуации горнорабочих.

Таким образом, задача геоинформационного моделирования маршрутов эвакуации при возникновении аварийной ситуации в очистных забоях угольных шахт представляется актуальной, поскольку достоверность и полнота сведений об уровне безопасности влияет на качество составления

плана ликвидации аварий и, как следствие, на успешное выполнение спасательных операций.

**Основная научная задача** заключается в генерации безопасных вариантов маршрутов эвакуации с использованием ГИС-технологий при составлении позиций в плане ликвидации аварий, за счет анализа периодически обновляемых пространственно-определенных данных о напряженно-деформированном состоянии горных пород, положения горнорабочих, аэрогазовых условий в горных выработках и оценки расхода ресурса самоспасателя.

**Цель работы** заключается в обеспечении информационной поддержки принятия управленческих решений при разработке и вводе в действие плана ликвидации аварий на горном предприятии, с учетом изменяющихся геомеханических ситуаций, для обоснования безопасности маршрутов эвакуации горнорабочих в целях уменьшения последствий чрезвычайной ситуации.

**Идея работы** заключается в определении маршрутов эвакуации, на основе периодического обновления данных о напряженно-деформированном состоянии, геометрии горных выработок, топологии вентиляционной сети и позиционирования горнорабочих посредством определения уровня риска передвижения по маршруту с учетом аэрогазовых условий в горных выработках и оценки времени расхода ресурса самоспасателя.

**Задачи исследования:**

– разработать геоинформационную модель маршрутов эвакуации для выбора рационального пути выхода на поверхность из угольной шахты на основе постоянно обновляемых пространственно-временных данных о состоянии угольной шахты;

– разработать математическое обеспечение решения задачи дискретной оптимизации, позволяющее обосновать безопасность выбранного маршрута посредством анализа пространственного расположения горных выработок,

очагов ЧС, физических данных персонала и ресурса индивидуальных средств защиты;

– разработать программное обеспечение для проведения геомоделирования маршрутов эвакуации горнорабочих для предоставления информационной поддержки при разработке позиций плана ликвидации аварии.

**Для решения поставленных задач использованы следующие методы:**

– хранения и обработки геопространственных данных на основе распределенного хранилища данных;

– теории графов для построения модели горных выработок;

– нахождения кратчайшего маршрута в неориентированном графе с очагами ЧС;

– построения трехмерных компьютерных геоизображений для визуализации результатов моделирования;

– объектно-ориентированного моделирования и программирования при разработке прикладного программного обеспечения с графическим интерфейсом.

**Научные положения:**

1. Актуализированное состояние геоинформационной модели маршрутов эвакуации горнорабочих обеспечивается за счет периодического обновления пространственно-определенных данных о напряженно-деформированном состоянии горного массива, геометрии горных выработок угольной шахты и топологии вентиляционной сети с периодичностью, определяемой частотой обновления сведений о пикетах в горных выработках.

2. Маршрут эвакуации персонала, наиболее рациональный по безопасности, определяется в результате логических и расчетных операций с геоданными, проводимых по созданному алгоритму, учитывающему оценку расхода ресурса самоспасателя и уровень риска передвижения по горным

выработкам, отличающегося учетом сведений о концентрации метана и вредных газов в горных выработках, а также скорости, направления движения, температуры и влажности воздуха.

3. Создание специализированных трехмерных геопространственных изображений маршрутов эвакуации посредством визуализации результатов их моделирования повышает оперативность поддержки принятия решений для определения маршрута на 21% при разработке позиций плана ликвидации аварий угольных шахт

**Научная новизна заключается:**

1. В создании геоинформационной модели маршрутов эвакуации, позволяющей корректировать пути выхода на поверхность из очистных забоев угольных шахт и отличающейся использованием периодически обновляемых пространственно-определенных данных о напряженно-деформированном состоянии углепородного массива, топологии вентиляционной сети, состоянии горных выработок и позиционировании горнорабочих.

2. В применении адаптированного алгоритма вычисления маршрута на неориентированном графе, отличающегося использованием ретроспективных результатов предыдущих итераций анализа геоданных по мере обновления сведений о топологии горных выработок в временном хранилище данных

3. В реализации программного обеспечения, отличающегося возможностью интерактивного взаимодействия с существующими информационными системами контроля пространственно-атрибутивного состояния углепородного массива горного предприятия.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности:

- использования геомоделирования аварийных ситуаций для разработки позиций плана ликвидации аварий угольных шахт;

- вычисления оценки уровня риска маршрутов эвакуации в позиции плана ликвидации аварий по весовым значениям ветвей графа с учетом физических данных горнорабочих;

- прогнозирования состояния геоинформационной модели посредством анализа временных витрин данных.

**Личный вклад автора** состоит в:

- разработке и апробации геоинформационной модели выбора рационального маршрута эвакуации для поддержки принятия решений при управлении аварийно-спасательными работами;

- разработке инструментария (методики, алгоритмы, компьютерные программы), применение которого позволит минимизировать последствия аварийных и ЧС за счет накопления результатов анализа во временном хранилище данных;

- разработке математического обеспечения с использованием численного метода поиска рационального маршрута эвакуации, включающего алгоритм расчета весов выработок и соотношений ресурсов индивидуальных средств защиты с прогнозируемым периодом времени выхода людей на поверхность.

**Апробация работы:**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на зарубежных научно-практических конференциях: «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2014» (Praha, 2014); международных научно-практических конференциях: «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (30-31 марта 2016 г, г. Прокопьевск); «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (Санкт-Петербург, 2012г., 2014г.); «Академическая наука - проблемы и достижения» (Москва, 2014г.).

Пакет компьютерных программ, реализованный на основе разработанной методики, удостоен: серебряной медали за инновационные технологии повышения эффективности и безопасности горных работ, представленные на конкурс "Лучший экспонат", проводимый в рамках I специализированной выставки "Недра России" в 2015г (г.Новокузнецк); золотой медали в номинации «Лучший экспонат» на конкурсе «Уголь России

и Майнинг» в 2014г (г.Новокузнецк); диплома первой степени в номинации «Лучший экспонат» на международной ярмарке-выставке «Экспо-Уголь» в 2012г (г.Новокузнецк).

### **Публикации**

По исследуемой теме автором опубликована 21 печатная работа, в которых отражено основное содержание диссертационной работы, из которых 5 работ – в журналах, рекомендованных ВАК. Оформлено 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы:** работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 138 страницах, содержит 29 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 105 наименований.

# **1 Обзор существующих решений проблемы безопасного ведения работ на шахтах угольных предприятий**

Проблемы безопасной добычи полезных ископаемых подземным способом являются актуальными для России и особенно для Кузбасского региона - региона с развитой угледобывающей отраслью [2]. На протяжении полувека, ученые пытались выявить закономерности поведения состояния угольного массива, накапливая и применяя экспериментальный опыт, используя математический аппарат. Выявлялись причины, из-за которых происходят чрезвычайные ситуации на угольных предприятиях. На основе чего строится комплекс мер, позволяющий управлять состоянием горного массива.

Управление состоянием горного массива представляет собой комплекс мероприятий, необходимый для преобразования состояния горного массива в состояние, позволяющее в соответствии с принятыми нормами безопасности проводить очистные работы на шахтах угольных предприятий [44].

В управлении горным массивом задействовано два класса объектов - техногенные и природные. Мониторинг состояния объектов каждого класса осуществляется посредством методов количественной и качественной оценки. Большинство этих методов основано на сравнении компонент деформации, смещения и напряжения, а также действующих внутри горного массива сил.

## **1.1 Травматизм на угольных шахтах**

По статистике, каждый миллион тонн угля, добытого подземным способом, обходится ценою более чем одной человеческой жизни [7]. В период с 2002-2013г. на территории России зарегистрировано 17 аварий на шахтах. Из них 11 аварий произошли в Кемеровской области. Количество погибших 433 человека, 36 пострадавших и 1 человек считается пропавшим без вести [8].

Характер причин аварий в 82% несчастных случаев кроется во внезапных выбросах метана (стихийное бедствие, несчастный случай, человеческий фактор) [9].

Внезапным выбросом называется непредумышленное выстреливание полезного ископаемого в рабочее пространство горной выработки (рис. 1). Продолжительность внезапного выброса — до нескольких секунд.

Шахты (рудники) разделяют по степени газообильности выработок выемочных участков и шахт (рудников) в целом. Угольные шахты по метану подразделяются на следующие категории [10]:

- I — до 5 м<sup>3</sup>/т; (количество метана, выделяющегося в сутки на 1 т. среднесуточной добычи, м<sup>3</sup>)
- II — 5—10 м<sup>3</sup>/т;
- III — 10—15 м<sup>3</sup>/т;
- IV (сверхкатегорийные) — свыше 15 м<sup>3</sup>/т или с суфлярными выделениями газа,
- V — шахты, разрабатывающие пласты, опасные или угрожаемые по внезапным выбросам угля или газа;
- VI — шахты, в которых происходят выбросы породы с выделением метана.

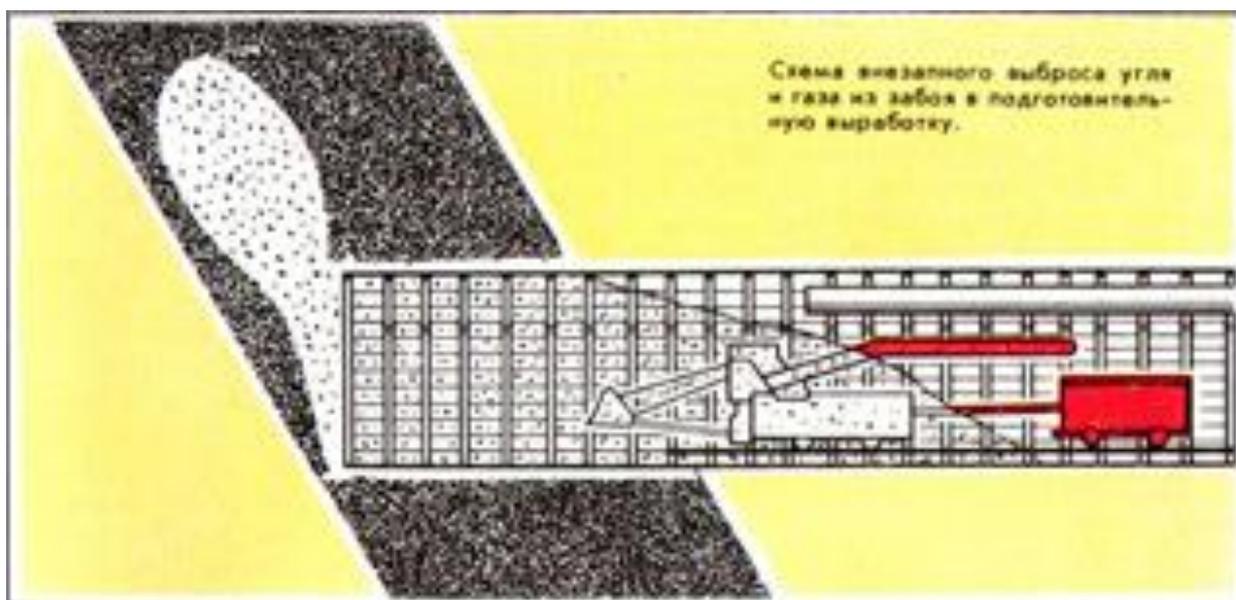


Рисунок 1 – Схематичное представление внезапного выброса

От категории зависит степень опасности работы в шахте – чем выше уровень, тем больше мероприятий необходимо провести для обеспечения безопасного ведения работ.

Помимо взрыва метановоздушной смеси (82%) выделяют следующие виды аварий:

- пожар - 16%;
- обрушение пород кровли - 1%;
- взрыв аммонита - 0,5%;
- затопление шахты - 0,5%.

Существует несколько представлений о механизме внезапного выброса и причинах его проявления. Отличаются они в основном оценкой участия во внезапном выбросе газа, напряженно-деформированного состояния массива, а также физико-механических и физико-химических свойств полезных ископаемых или породы. Изучение и предупреждение этого, опасного для жизни персонала, явления находится в центре внимания ученых горного профиля, производственников и ученых по изучению верхних слоев земной коры [11].

### **Внезапный выброс газа**

На участке с низкой проницаемостью породы, при появляющейся трещине при стремительном передвижении забоя образуется опасный перепад давления природного газа в очень тонком пласте около свободной поверхности, что может привести к разрушению этого слоя. Вместе с разрушением слоя породы, его отбрасывает в сторону выработанного пространства за счёт энергии расширяющегося газа. При этом давление газа у только что образовавшейся свободной поверхности быстро понижается, снова создаётся перепад давлений и т.д. Таким образом, свободная поверхность быстро перемещается в глубь массива и всё время поддерживается большой перепад давления, разрушающий один слой за другим [16]. В другом представлении о внезапном выбросе процесс разрушения (дробления) угля

или породы связывается только с напряжённым состоянием и несущей способностью массива около горной выработки, а процесс отброса частиц быстро разрушающегося массива — с энергией расширяющегося газа, сжатого при высоком давлении [17].

Некоторыми исследователями в предпринимается небезуспешные попытки обосновать появление дополнительного, помимо уже существующего метана в угле, за счет механохимических реакций при его разрушении [12], которые базируются на учете строения угольного вещества и его химическом составе. По этим оценкам максимально возможное, предельное количество дополнительного метана в этом случае составляет не более  $50\text{м}^3$ .

### **Обрушение горных пород**

Во время ведения горных работ происходят обрушения нависающего массива как угольных пластов, так и вмещающих пород. Обрушения вмещающих пород и угля происходят как в очистных, так и в капитальных подготовительных выработках. Основная технологическая причина обрушения вмещающих пород и угля – это ненадежное крепление горных выработок [19].

В капитальных и подготовительных выработках обрушение нависающего породного массива и угля происходит, как правило, на незакрепленных участках между забоем выработки и постоянной крепью, а также на участках закрепленных постоянной крепью, если крепь не имеет плотного контакта с массивом горных пород.

В очистных выработках обрушение пород кровли может представлять опасность для людей, работающих в лавах, в основном на участках между забоем выработки и крепью [18].

Наибольшую сложность по борьбе с обрушениями, представляет предотвращение их в очистных выработках на угольных пластах наклонного и крутого залегания, поскольку в этих случаях обрушение угля может

происходить непосредственно из забоя угольного пласта, закрепить который не всегда представляется возможным.

Перечислим причины, способные вызвать обрушение:

1. принудительным влиянием на породу (посредством взрыва, механическим и гидравлическим) [23];
2. влияние на породу, часть породы естественных природных факторов таких, как вода, температура, выветривание;
3. внезапные выбросы газа, угля, землетрясения, воздействие подземных толчков при горных ударах [13].

## **1.2 Этапы составления плана ликвидации аварий**

План ликвидации аварий (ПЛА) — совокупность заранее разработанных сценариев, содержащих мероприятия по спасению людей и ликвидации аварии в начальный период возникновения и предупреждения ее развития [102].

ПЛА создается для случаев возможных аварий в соответствии с Инструкцией по составлению планов ликвидации аварий на каждые 6 месяцев главным инженером шахты и командиром обслуживающего шахту горноспасательного взвода, согласовывается с командиром военизированного горноспасательного отряда (ВГСО) и утверждается соответствующим техническим руководителем ГП (ПО, самостоятельной шахты и др.) за 15 дней до ввода в действие.

Основная задача ПЛА заключается в обеспечении безопасности горнорабочих и ликвидации аварий в начальной стадии. Если мероприятия, описанные в ПЛА были исполнены, однако авария не ликвидирована или требуется ликвидация ее последствий, то разрабатывается иной документ - оперативный план ликвидации аварий, составление которого осуществляется в соответствии с требованиями Устава ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ.

Перед составлением ПЛА, в соответствии с инструкцией, подвергаются проверке следующие позиции:

- обеспеченность шахты, горизонтов и горных выработок запасными выходами;
- соответствие времени движения по загазированным выработкам сроку защитного действия самоспасателей;
- наличие, состояние и расположение средств спасения горнорабочих и подготовленность работников к их использованию;
- ожидаемая газовая обстановка на участках в случае отключения дегазационной системы;
- время загазирования тупиковых забоев в случае остановки ВМП;
- устойчивость вентиляционных струй при тепловой депрессии пожара;
- состояние вентиляционных устройств;
- наличие и состояние средств оповещения об аварии;
- размещение пунктов и расстановку членов ВГК;
- водоснабжение, обеспеченность и состояние средств пожаротушения.

По результатам проведенных проверок определяются зоны поражения при различных вариантах аварий: взрывах, внезапных выбросах, горных ударах, обрушениях, пожарах, затоплении и д. р., вычисляется зона реверсирования вентиляционной струи, оценивается уровень пожароопасности в горных выработках угольных шахт. Материалы проверок оформляются актами и рассматриваются на совещании при главном инженере шахты с участием командира взвода ГВГСС.

План ликвидации аварий содержит:

1. Оперативную часть, состоящую из позиций и являющейся основным его содержанием.
2. Обязанности и порядок действия должностных лиц, участвующих в ликвидации аварий.

3. Список должностных лиц и учреждений, которые должны быть немедленно извещены об аварии.

4. Основные правила поведения (действия) работников шахты при авариях.

5. Указания по ликвидации последствий аварийных ситуаций (загазирование, остановка ВГП, застревание клетки или обрыв каната, общешахтное отключение электроэнергии, истечение хлора из хлораторной, выход из строя изотопных датчиков).

К оперативной части ПЛА прикладывается следующая графическая документация.

1. Схема вентиляции шахты (рис.2).

2. Схема горных выработок и план поверхности шахты (на схеме горных выработок дополнительно указываются места расположения средств пожаротушения, оповещения об аварии и группового спасения рабочих, а на плане поверхности - схема подачи воды в шахту и подъездные пути к стволам и шурфам).

3. Планы горных работ по пластам или горизонтам (на планах дополнительно указывается направление движения воздуха, места установки телефонов и их номера).

4. Микросхемы горных выработок шахты (микросхемы горных выработок прилагаются только к экземпляру плана, хранящемуся в ГВГСС, и предназначены для выдачи командирам отделений при выходе на задание).

Ответственность за корректность разработанного ПЛА и его соответствие актуализированному состоянию угольной шахте возлагается на главного инженера шахты и командира горноспасательного взвода. При вводе новых участков и выработок, корректировке схемы вентиляции и запасных выходов главный инженер шахты обязан в течение 24 часов внести изменения в ПЛА, после чего согласовать поправки и дополнения с командиром горноспасательного взвода, обслуживающего шахту. В случае, если необходимы изменения не будут внесены или будет обнаружена

несоответствия плана актуальному состоянию шахты, командир ВГСО имеет право признать недействительным ПЛА, а командир взвода – отдельные его позиции. ПЛА должны храниться у горного диспетчера и в горноспасательном взводе.

Изучение ПЛА инженерно-техническими работниками шахты производится под руководством главного инженера. Ответственность за ознакомление рабочих с правилами поведения при авариях и запасными выходами несет начальник участка. После ознакомления с правилами поведения при возникновении аварии и запасными выходами работники расписываются об этом в Книге инструктажа по безопасности работ. Ответственным руководителем работ по ликвидации аварий является главный инженер шахты, а до его прибытия на шахту – горный диспетчер.

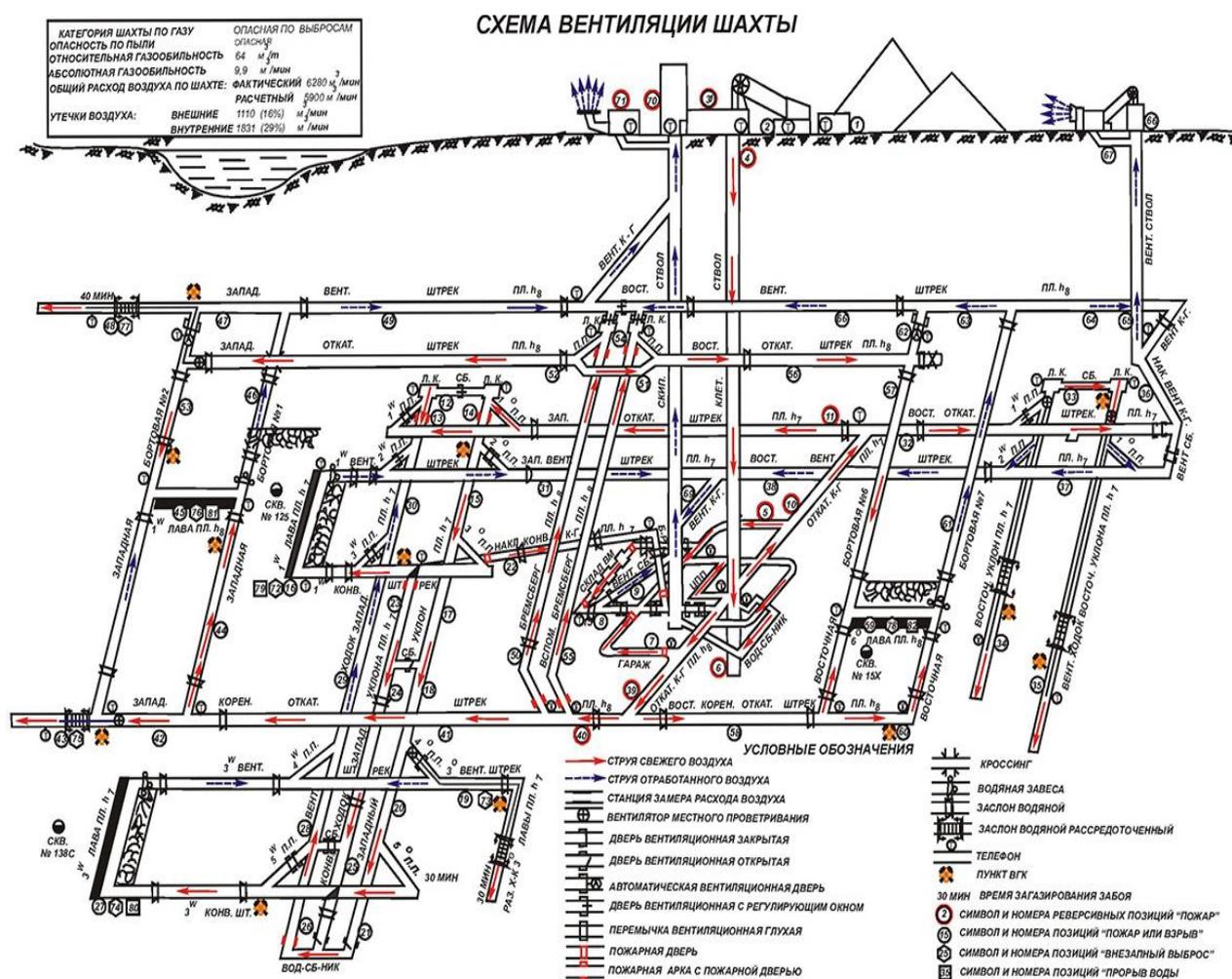


Рисунок 2 - Схема вентиляции шахты к плану ликвидации аварий

Основной структурной частью ПЛА является позиция. Каждая позиция имеет следующие атрибуты: наименование, порядковый номер, условный символ, изображение выработок позиции (аварийного участка) на схеме вентиляции шахты и текстовое содержание.

Наименование позиции состоит из наименования выработок позиции (аварийного участка) и возможной в этих выработках (на этом участке) аварии. К выработкам позиции или аварийного участка относят выработку, часть выработки или несколько сопряженных выработок.

Сопряженные выработки и случае пожара или взрыва допускается включать в одну позицию, если для этих выработок и аварий соблюдаются следующие условия: предусматривается одинаковый аварийный режим проветривания; применяют одинаковые мероприятия по спасению людей; совпадают маршруты движения горноспасательных отделений и порядок выполнения ими работ.

Для каждой тупиковой выработки на случай пожара и (или) взрыва разрабатывается (составляется) отдельная позиция.

На схеме вентиляции шахты выработки позиции выделяют (раскрашивают) одним цветом, позиции нумеруют, начиная с поверхности по направлению движения вентиляционной струи, проставляют номера позиций внутри символов и окрашивают символы в цвет выработок позиций.

Текстовое содержание позиций составляют (разрабатывают) и оформляют по специальной форме в виде «таблиц» (табл.1).

Из текстового содержания позиций формируют в виде альбома оперативную часть ПЛА. В оперативной части позиции описывают в возрастающем порядке, причем номер каждой позиции должен совпадать с соответствующим номером страницы оперативной части.

Позиции оперативной части составляют в зависимости от вида аварии на следующие выработки и объекты шахты:

## Пример позиции плана ликвидации аварий

Мероприятия по спасению людей и ликвидации аварий	Ответственные за мероприятия исполнители	Пути и время выхода людей	Пути движения отделений ГВГСС и задания
<p>1. Вызвать 1-й взвод 3-го ВГСО. Обеспечить прибытие на шахту отделений ГВГСС и автомобилей со специальной техникой в соответствии с диспозицией выезда отряда на аварию.</p> <p>2. Обеспечить нормальную работу вентиляторов главного проветривания скипового и вентиляционного стволов.</p> <p>3. Отключить электроэнергию:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- при пожаре в 1<sup>W</sup> лаве, отключив ячейки 5 и 6 на РПП –3;</li> <li>- при взрыве в шахту, отключив вводы 1, 2 и 3 в поверхностной подстанции.</li> </ul> <p>4. Оповестить все участки об аварии по телефону.</p> <p>5. Подготовить механизированную доставку людей и отделений ГВГСС.</p> <p>6. Направить членов ВГК из близлежащих выработок с респираторами и средствами пожаротушения по запад. уклону и далее по 1<sup>W</sup> конв. штреку для тушения пожара со стороны свежей струи.</p> <p>7. Обеспечить подачу воды на 1<sup>W</sup> конв. и 1<sup>W</sup> вент. штреки.</p> <p>8.1 Включить водяную завесу на 1<sup>W</sup> вент. штреке.</p> <p>8.2 Подготовить электровоз и порожние вагонетки для доставки техники пожаротушения.</p> <p>9. Обеспечить подачу сжатого воздуха в шахту.</p> <p>10. Направить в шахту отделения ГВГСС.</p>	<p><u>Диспетчер</u> Телефонистка <u>Ком отряда</u> Ком. взвода</p> <p><u>Главн. механик</u> Диспетчер, маш. вентиляторов</p> <p><u>Главн. энергетик</u> Деж. слесарь <u>Главн. энергетик</u> Деж. электропод. <u>Диспетчер</u> Телефонистка <u>Нач. УИШТ</u> Маш. электровоз</p> <p><u>Главн. инженер</u> Диспетчер, ком. ШГС, чл. ВГК</p> <p><u>Главн. механик</u> Деж. водотлива <u>Главн. механик</u> Деж. слесарь <u>Нач. УИШТ</u> Маш. электровоз</p> <p><u>Главн. механик</u> Маш. компрес.ст. <u>Главн. инженер</u> Ком. Взвода</p>	<p>При пожаре вывести людей:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- находящихся за очагом пожара в 1<sup>W</sup> конв. штреке на участке от 3<sup>W</sup> пр. пл. до лавы, 1<sup>W</sup> лаве, 1<sup>W</sup> вент. штреке по 2<sup>W</sup> пр. пл., вент. ходку, 1<sup>W</sup> пр. пл., зап. откат. штреку, откат. кв-гу к клетевому стволу и на поверхность.– 25 (15) мин.</li> <li>- находящихся до очага пожара в 1<sup>W</sup> конв. штреке на участке от 3<sup>W</sup> пр. пл. до лавы, 1<sup>W</sup> лаве, 1<sup>W</sup> вент. штреке по 2<sup>W</sup> пр. пл., ходку запад. уклона, 1<sup>W</sup> пр. пл., зап. откат. штреку, откат. кв-гу на пл. к клетевому стволу</li> <li>- находящихся в 1<sup>W</sup> вент. штреке на участке от 2<sup>W</sup> пр. пл. до 2<sup>0</sup> пр. пл., по 2<sup>0</sup> пр. зап. откат. штреку клетевому стволу и на поверхность.– 25 (15) мин.</li> <li>- находящихся в зап. вент. штреке по вост. вент. штреку, вост. откат. штреку. к клетевому стволу и на поверхность.– 25 (15) мин.</li> <li>- находящихся на вент. квершлага к скиповому стволу и на поверхность – 25 (15) мин.</li> <li>- находящихся во 2<sup>W</sup> и 2<sup>0</sup> пр. пл. по зап. откат. штреку к клетевому стволу и на поверхность.– 25 (15) мин.</li> <li>- находящихся в вост. вент. штреке по вост. откат. штреку. к клетевому стволу и на поверхность.– 25 (15) мин.</li> </ul> <p>При взрыве вывести всех людей из шахты к клетевому стволу и на поверхность.</p>	<p>Направить в шахту отделения ГВГСС:</p> <p>1-е отделение по клет. стволу, откат. кв-гу, зап. откат. штреку, 1<sup>W</sup> пр. пл., вент. ходку, 2<sup>W</sup> пр. пл. на 1<sup>W</sup> вент. штрек, 1<sup>W</sup> лаву, 1<sup>W</sup> конв. штрек к очагу аварии для спасения людей и вывода их обратным путем на поверхность.</p> <p>2-е отделение по клет. стволу, откат. кв-гу, зап. откат. штреку, 1<sup>0</sup> пр. пл., зап. уклону, 3<sup>0</sup> пр. пл. ке на 1<sup>W</sup> конв. штрек, 1<sup>W</sup> лаву, 1<sup>W</sup> вент. штрек к очагу аварии: при пожаре для его ликвидации со стороны свежей струи; при взрыве – для спасения людей и вывода их обратным путем на поверхность.</p> <p>3-е отделение по клет. стволу, откат. кв-гу, зап. откат. штреку, 1<sup>0</sup> пр. пл., зап. уклону, 2<sup>0</sup> пр. пл-ке для обследования 1<sup>W</sup> вент. штрека до 2<sup>W</sup> пр. пл-ки и вывода людей на свежую струю и на поверхность.</p> <p>4-е отделение по клет. стволу, откат. кв-гу, зап. откат. штреку, 1<sup>0</sup> пр. пл., зап. уклону, 2<sup>0</sup> пр. пл-ке для обследования зап. вент. штрека, вент. кв-га и вывода людей на свежую струю и на поверхность.</p> <p>Последующие отделения направляются по усмотрению руководителя работ по ликвидации аварии.</p>

– пожар - на все выработки шахты и примыкающие к ним надшахтные здания, сооружения и обогатительные фабрики (установки), при пожаре в которых продукты горения могут попасть в шахту, а также на здания подъемных машин;

– взрыв – на все выработки газовых шахт, в которых обнаружен метан при нормальном режиме проветривания, выработки и сооружения с интенсивным пылеобразованием на шахтах, опасных по взрывчатости угольной пыли (очистные и тупиковые забои, угольных загрузок, выработки по которым уголь движется самотеком), подземные склады ВМ, зарядные камеры, гараж;

– внезапный выброс – на все очистные и подготовительные забои на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа;

- прорыв воды (пульпы) и затопление – на все выработки и зоны, опасные по прорыву воды (пульпы);
- горный удар – на все выработки и зоны, опасные по горным ударам;
- обрушение угля (породы) – на все выработки шахты составляется одна общая позиция;
- аварийные ситуации – для каждой аварийной ситуации составляется одна общая позиция.

При составлении позиций в основу ложится корректный выбор аварийного вентиляционного режима проветривания шахты и аварийного участка. Аварийный вентиляционный режим определяется, прежде всего, режимом работы вентиляторов прямого проветривания (ВГП). Применяют следующие аварийные вентиляционные режимы проветривания:

- нормальный, предусматривающий нормальную работу ВГП с сохранением или увеличением подачи воздуха в шахту;
- реверсивный, предусматривающий реверсирование ВГП с изменением направления движения вентиляционной струи по всей шахте;
- нулевой, предусматривающий остановку ВГП и проветривание шахты за счет естественной депрессии;
- нормальный, предусматривающий нормальную работу ВГП с сохранением подачи воздуха в шахту и местным изменением режима проветривания аварийного участка.

Нормальный режим проветривания применяют при взрывах, выбросах, прорывах воды, а также при пожарах не в зоне реверса.

Реверсивный режим проветривания следует однозначно применять при пожарах в зоне реверса, к которой относятся надшахтные здания, стволы, выработки околовольных дворов, по которым поступает свежий воздух в шахту. Реверсирование ВГП в этих случаях обеспечивает вынос газообразных продуктов горения кратчайшим путем на поверхность, минуя основные места работы людей.

При нагнетательном способе проветривания шахты несколькими вентиляторами главного проветривания и пожаре в здании и канале вентилятора аварийный вентилятор останавливается, а остальные работают в нормальном режиме.

Нулевой режим может осуществляться на не газовых шахтах при пожарах в главных вентиляционных выработках для снижения скорости распространения пожарных газов.

Нормальный режим проветривания шахты с изменением местного режима проветривания аварийного участка применяют только для отдельных случаев пожаров в пределах выемочных полей.

Повышение расхода воздуха предусматривается при пожарах в наклонных выработках с нисходящим проветриванием с целью предотвращения опрокидывания вентиляционной струи под действием тепловой депрессии. Это достигается за счет увеличения сопротивления в параллельных выработках и в сбойках между ними при закрытии вентиляционных дверей.

Уменьшение расхода воздуха предусматривается при пожарах в наклонных выработках с восходящим проветриванием для снижения активности развития пожара и предотвращения рециркуляции продуктов горения под действием тепловой депрессии. В основном, это достигается путем закрытия пожарных дверей до очага пожара.

При составлении позиций важно правильное определение выработок так называемых угрожаемых участков. В общем виде к угрожаемым участкам относят выработки, в которые могут попасть продукты аварии или которые в результате аварии и при принятом вентиляционном режиме лишились запасного (для выработок, проветриваемых за счет обще шахтной депрессии) или основного (для тупиковых выработок) выхода.

В зависимости от вида аварии к угрожаемым участкам относят:

- при взрыве - все выработки шахты, так как под действием ударной волны могут быть нарушены вентиляционные сооружения шахты и может наступить так называемый «вентиляционный хаос»;
- при пожаре – выработки, по которым распространяются газообразные продукты аварии при нормальном режиме, а также выработки и надшахтные здания при реверсивном режиме проветривания;
- при выбросе - выработки, по которым распространяются газообразные продукты аварии;
- при прорыве воды - выработки, по которым устремляется вода, включая самую углубленную выработку (следует иметь ввиду, что на отдельных шахтах вместе с водой возможно поступление различных газов);
- при отсутствии двух пригодных для использования выходов из выработки или из шахты (загазировании, затоплении и т. п. одного из выходов) – эта выработка или вся шахта;
- при отсутствии (загазировании, затоплении и т. п.) выхода из тупиковой выработки - эта выработка.

Все остальные выработки шахты относят к неопасным. Таким образом, одной из ключевых задач является определение безопасных выработок в актуализированном состоянии угольной шахты для составления маршрута эвакуации горнорабочих.

### **1.3 Обзор существующих горных ГИС для угольных шахт**

Развитие пространственного анализа и геоинформатики стало возможным благодаря стремительному развитию в областях компьютерных технологий, информатики и компьютерной графики. До этого же попытки автоматизации в области картографии носили экспериментальный характер и по большей части не получили обширного развития.

Первые упоминание о применении пространственно-атрибутивного анализа датируются XVIII-XIX веком:

- в 1781 году французский картограф Луи-Александр Бертье (Louis-Alexandre Berthier) в сражении под Йорктауном (Yorktown) накладывал на географическую карту прозрачные слои для отображения передвижения войск [8,9];

- в 1838 году Ричард Гриффит (Richard Griffith), Генри Харнесс (Henry Harness) и Томас Ларком (Thomas Larcom) создали «Атлас для сопровождения Второго доклада Ирландских Железнодорожных Уполномоченных» (Atlas to Accompany the Second report of the Irish Railway Commissioners), в котором были отображены население, поток трафика, геология и рельеф, наложенные на одной и той же базовой карте [12].

- в сентябре 1854 года, доктор Джон Сноу (Dr. John Snow) использовал карту, показывающую расположение смертей от холеры в центре Лондона, чтобы отслеживать источник вспышки заражения [10,11].

Классически, периодизацию развития геоинформатики начинают с 1960-х годов. В этот период начинают формироваться первые представления о пространственном анализе, проводятся первые экспериментальные проекты по созданию ГИС. Наиболее ярким представителем этого периода является Канадская ГИС (КГИС), разработанная под руководством Р.Томлинсона (R Tomlinson) в 1963-1971. Данная система создавалась для анализа данных инвентаризации земель Канады в области рационального землепользования. Уникальность этой системы заключается в никогда до этого не использовавшихся в геоинформатике, технологиях наложения и измерения площадей земель. Впервые были предприняты попытки предоставления дистанционного доступа, однако в силу слабого развития информационных и компьютерных технологий система не получила обширного развития. Тем не менее, технологии и методики, использовавшиеся в этой системе впервые, в последствие получили развитие в дальнейших ГИС.

Второй этап развития датируется 70-ми годами XX века. За десять лет технологии геоинформатики были оптимизированы и успешно применялись для решения многих прикладных задач, однако стоимость и

производительность существующего оборудования пока не позволяла оперативно анализировать и обрабатывать большие объемы данных. Этот период характеризуется формулированием геоинформатики как науки благодаря обмену опытом между различными научными школами, проводившими эксперименты в области построения ГИС.

Третий этап связан с бурным развитием компьютерных технологий, появлением глобальной сети интернет и, хронологически, берет начало в конце 70-х, начале в 80-х годов. Во многих организациях персональные компьютеры начинают вытесняться рабочими станциями. В этот период устанавливается баланс между методологическим развитием геоинформатики и техническими возможностями для реализации. ГИС из экспериментальных разработок превращаются в коммерческие программные продукты (ARC/INFO). Осваиваются новые источники данных (космические спутники). Интегрируются цифровые методы обработки географических карт с современными средствами автоматизации.

Современный этап развития ГИС характеризуется совершенствованием освоенных технологий, высокой конкуренцией между коммерческими организациями разработкой ГИС. Основная идея топологического структурирования в ГИС начинает дополняться технологиями интеллектуального и эвристического анализа. Клиент-серверные технологии заменяются технологиями облачных вычислений, позволяя наращивать объемы атрибутивной и пространственной составляющей до необходимых показателей. Появляются открытые электронные карты и интернет-сервисы, позволяющие с помощью открытого API решать стандартную задачу геоинформатики: анализ пространственных взаимоотношений объектов, объединенных одной территорией.

Таким образом, ГИС подходят для решения задач по представлению угольных пластов, данных геологической разведки, горных выработок и объектов, расположенных на поверхности, в виде цифровых моделей [47]. В

связи с этим, при решении задач автоматизации ведения горных работ целесообразно интегрировать ГИС в горные информационные системы.

Теоретические основы разработки ГИС сформулированы российскими исследователями: А.М. Берлянт, А.В. Кошкарев, И.К. Лурье, Н.С. Сербенюк, В. С. Тикунов и другими, а также зарубежными авторами: П.А.Берроу (*Burrough P.A*), М.Н. ДеМерс (*Michael N.DeMers*), Р.А.Макдоннелл (*McDonnellR.A*), Дж. Л.Моррисон (*Morrison J.L.*), Цайлер М. (*Zeiler M.*) и другими. Значительный вклад в развитие стандартов ГИС сделан Open Geospatial Consortium (*OGC*).

На сегодняшний день существует множество программных комплексов для визуализации углепородного массива в статике [68]: зарубежные («Datamine», «GEMCOM», «Vulcan», «Micromine», «Surpac» и др.) и отечественные (МНПО «Полиметалл», ОАО ГМК «Норильский Никель», Костамукшский ГОК, и другие). Эти программные пакеты давно зарекомендовали себя на рынке визуализации процессов горнодобывающего предприятия, однако в этих информационных системах не решаются задачи геомеханики, крепления горных выработок, только частично решаются проблемы электроснабжения и вентиляция, т.е. задачи, связанные с безопасностью ведения горных работ. Помимо этого, в существующих горных информационных системах, отсутствует механизм сопоставления атрибутивных данных с пространственным [94].

Существует проблема создания интерфейса между современными горными информационными системами. Основная, хотя и не единственная заслуга развития систем с открытой архитектурой принадлежит, в первую очередь стабилизирующимся соглашениям о создании унифицированных правил, благодаря которым стали доступны интерфейсы для взаимодействия аппаратных и программных средств. Также, частично эту проблему решает визуализация, которая играет роль интерфейса между полученными результатами исследования и исследователем, причем более наглядного и эргономичного по сравнению с массивами численных данных [69]. Это

помогает увеличить оперативность принятия решения в плохо формализуемых задачах, где нет четких критериев оценки ситуации. Таким образом, с точки зрения слабо формализованных задач, визуализацию можно отнести к интеллектуальным методам решения задач, поскольку она обеспечивает специалиста, принимающего решение, необходимой информацией и рекомендациями, что позволяет осуществить необходимый выбор среди множества альтернатив.

Проблема анализа углепородного массива решена в рамках геомеханики, однако результат анализа нуждается в наглядном представлении. Так, например, в результате расчета напряжения в углепородном массиве формируется три значения напряжения ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) для каждого конечного элемента. В случае с динамическим моделированием количество полученных значений увеличивается пропорционально количеству моделируемых состояний. Это порождает две проблемы: необходимость структурированного хранения большого объема геопространственных данных и необходимость создания картографической анимации для визуализации динамики.

Поскольку система является аналитической, то помимо качественных технологий хранения и обработки данных в ней должны реализовываться функции анализа и интерпретации полученных результатов. Это позволит определить тенденцию в изменении показателей и выработать рекомендации по улучшению технологии ведения горных работ с точки зрения безопасности на моделируемом шаге.

Основным преимуществом геоинформационных систем перед АСУТП и АСУ является возможность учета пространственных отношений между объектами. Используя эти отношения можно более эффективно решать задачи управления пространственно распределенными объектами, каким является угледобывающее предприятие [21]. Геоинформационная система как средство интеграции разнородных пространственно распределенных данных может быть эффективно использована при автоматизации многих технологических

процессов горнодобывающего предприятия на этапах разведки и разработки месторождения [24].

### **Существующие горные информационные системы**

Современные программы отличаются интерактивной графикой, визуализацией поверхностей с высоким качеством, а также эвристическими и интеллектуальными алгоритмами при решении задач. Удешевление производительных технических мощностей позволило еще больше нарастить объемы производства горных предприятий, однако на сегодняшний день рост эффективности существенно замедлился по двум причинам:

- большинство горных предприятий применяют информационные технологии для улучшения конкретных производственных процессов, вместо комплексно решения по автоматизации;
- много усилий тратится на автоматизацию классических методов работы горного предприятия, некоторые из которых устарели и требуют изменения и улучшения на концептуальном уровне[86].

Все существующие горные информационные системы можно разделить на следующие категории:

- Стандартные горные информационные системы.

Эти системы обеспечивают автоматизацию типичных процессов, которые характеризуется общими чертами для любого горного предприятия: оценка запасов, геологическое моделирование, проектирование и планирование горных работ. Наиболее популярными компаниями, которые разрабатывают такие системы являются Datamine, Gemcom, Maptek, Mintec и Surpac.

- Специализированные горные информационные системы.

К ним относятся специализированные программы для задач, которые, как правило, не решаются средствами стандартных горных информационных систем: оптимизация карьеров, календарное планирование, буровзрывные работы, вентиляция, геомеханика, экология и т.д.

– Автоматизированные горные информационные системы.

Эта категория объединяет программное и техническое обеспечение, используемое для управления производством в реальном времени. Обычные направления использования: управление горным транспортом, экскаваторами, буровыми станками, и т.п. Эти системы предлагаются небольшим количеством компаний, среди которых (в области открытых работ) имеется 4 лидера: Modular Mining Systems, Wenco, Trilonics и Aquila. Все большее значение приобретает связь этих компаний с производителями горного оборудования, такими как Komatsu и Caterpillar.

– Горные информационные системы документооборота.

Обеспечивают учет различных показателей в реальном времени и формируют различные отчеты. Как правило, такие информационные системы представляют собой небольшое клиентское приложение, построенное на базе архитектуры клиент сервер, и используют распределенную систему баз данных.

### **RockWare**

Наиболее крупным поставщиком недорогих компьютерных программ в области наук о Земле является компания RockWare которая регулярно выпускает иллюстрированный бюллетень с перечнем и краткой характеристикой предлагаемых продуктов, количество которых более 500. Возможно использование демонстрационных версий предлагаемых продуктов, а в некоторых случаях - полных рабочих версии, работающих в течение ограниченного промежутка времени [28].

Компания развивает также свою систему для автоматизации геологических расчетов и создания чертежей «RockWorks2002», стоимость которой составляет \$1000.

Обычный тематический перечень программ включает в себя разделы:

- системы автоматизированного проектирования;
- топография;
- обработка данных;

- геомеханические расчеты;
- гидрогеология;
- теория распознавания образов;
- обработка каротажных данных;
- картирование и ГИС;
- каркасное моделирование и расчеты объемов;
- статистика, геостатистика, графический анализ;
- структурная геология, стратиграфия и тектоника плит;
- моделирование поверхностей и построение изолиний.

### **Vulcan**

Австралийская компания KJRA Systems, являющаяся членом известной группы компаний MAPTEK [30], разработала и продает мощную и достаточно дорогую интегрированную систему «Vulkan», имеющую большой набор модулей для решения самых разных задач в области геологии, горного дела, маркшейдерии, экологии:

- набор программ для детальной обработки геологоразведочной информации;
- инструменты для моделирования геологических объектов, в т.ч. - месторождений нефти и газа;
- проектирование карьеров и подземных рудников на рудных и пластовых месторождениях;
- контроль качества добываемой руды;
- проектирование массовых взрывов на подземных рудниках;
- оптимизация календарного плана горного предприятия;
- проектирование генпланов предприятий;
- моделирование экологических ситуаций;
- детальные маркшейдерские расчеты, графика. Использование возможностей систем точного географического позиционирования (GPS);
- возможности высокоточного лазерного моделирования объектов (I-Site);

- интерфейсы для импорта/экспорта информации для большинства горных систем и общераспространенных пакетов программ;
- мощные средства для получения изображений и вывода графики.

### **Surpac**

Австралийская компания Surpac Software International [31] является автором широко распространенной в мире (около 1000 пользователей), достаточно развитой и мощной системы Surpac Vision, а также других продуктов: Quarry Современный пакет для горных предприятий химической, неметаллорудной и строительной промышленности. В него включены функции проектирования карьеров и планирования производства.

Система состоит из следующих модулей:

- моделирование и оценка запасов месторождений, включая геостатистику;
- проектирование карьеров;
- проектирование подземных рудников;
- маркшейдерские расчеты;
- контроль качества рудопотоков;
- календарное планирование;
- обработка геологоразведочной информации;
- обработка данных по скважинам, включая каротаж.

Scheduling - пакет создан для всестороннего календарного планирования любого горного производства.

Xplorpac - набор современных программ для геологоразведочных организаций, который автоматизирует практически все расчеты, связанные с этими работами, в т.ч. и в полевых условиях.

### **Обзор существующих информационных систем обеспечения безопасности при ведении горных работ**

На шахтах «Березовская» и «Первомайская», в «Шахтоуправление Анжерское», На горно-металлургическом комбинате (ГМК) "Норильский

Никель" внедрена система «Талнах-координата» (рис. 3) для определения местонахождения персонала и его оповещении об аварии. В состав комплекса входит система позиционирования «Талнах-координата», позволяющая вести базы данных (БД) о местонахождении горнорабочих и самоходной техники под землей. Доступ к базе данных осуществляется с удаленных автоматизированных рабочих мест диспетчеров или инженерно-технического персонала с использованием локальной вычислительной сети шахты (рудника). На рабочих местах устанавливается специализированное программное обеспечение - «Талнах-координата».

Информация о положении абонентов может быть представлена как в табличном, так и в графическом виде на электронных планах подземных выработок. Система позволяет точно определить местонахождение шахтеров в подземных выработках и обеспечить поиск людей, застигнутых аварией. Наряду с позиционированием и табельным учетом к основным функциям комплекса относится организация подземной диспетчерской радиосвязи. Связь в выработках обеспечивается на протяжении всей трассы излучающего кабеля.

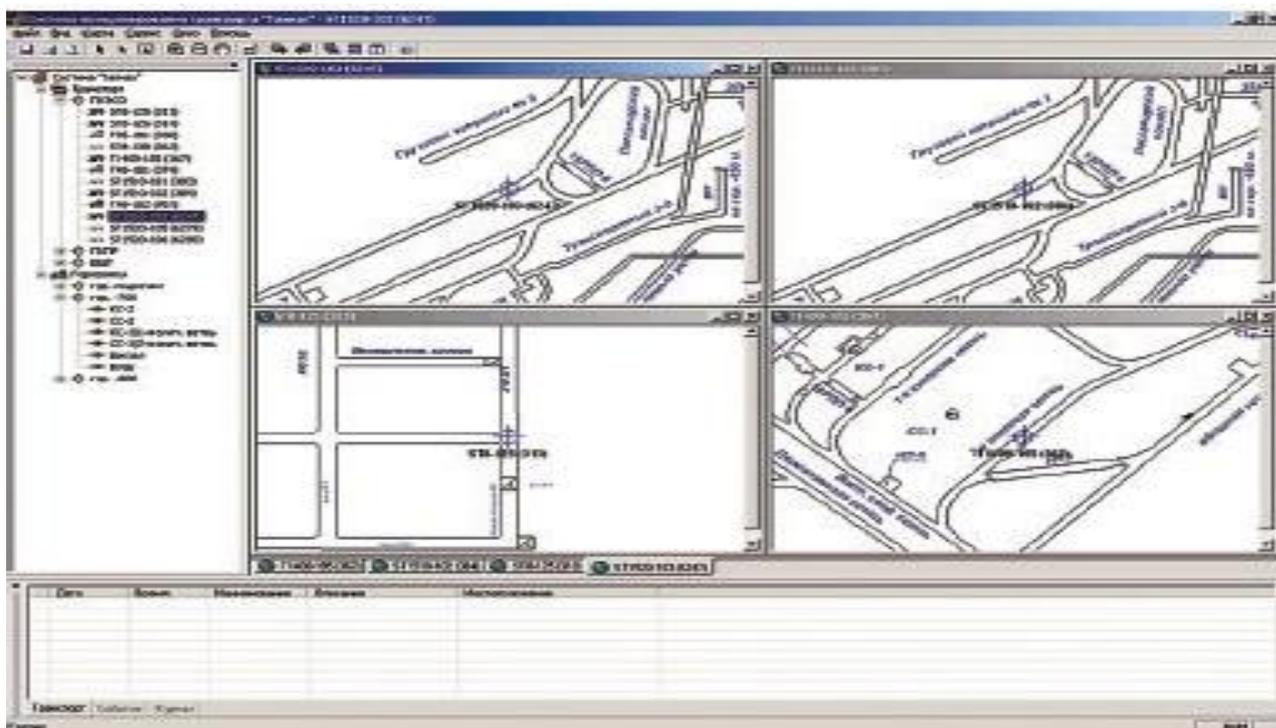


Рисунок 3 – Графический интерфейс информационной системы «Талнах».

Диспетчер в любой момент может связаться с любым радиоабонентом под землей для решения технологических задач либо введения ПЛА.

При подключении комплекса к АТС предприятия на связь с радиоабонентом под землей может выйти любой сотрудник (при отсутствии ограниченного доступа) – от горного диспетчера до руководителя предприятия. Эффективно организованная радиосвязь под землей дает в руки руководителей и технологов мощный инструмент управления, что способствует укреплению производственной дисциплины и увеличению объемов добычи. Внедрения системы позволило организовать прямую радиосвязь с абонентами, находящимися под землей, как с рабочего места горного диспетчера, так и с любого телефонного номера через АТС шахты [25].

В Свердловской области, в ВУЗе УГГУ коллектив Горно-механического факультета кафедры автоматических технологий и кибернетики, под научным управлением доктора технических наук Э. Лапина, команда специалистов осуществила создание информационной программной системы с аппаратным функционалом для аналитического состояния мониторинга для управления горным массивом. Разработанный продукт создавался для обеспечения безопасной работы на шахтах угольных предприятий. Система позволяет моделировать и прогнозировать аварийные происшествия в горных выработках, предотвращая возможные несчастные случаи среди горняков. Было внедрено специальное технологичное аппаратное обеспечение в виде функциональных контроллеров, передающих данных в информационную систему. Контроллеры осуществляют мониторинг сейсмического фон горного массива, фиксируя данные о внутренних горных ударах, создающих сейсмические сигналы. Данные, поступая на сервер проходят обработку, что позволяет в качестве результата формировать визуализацию зон напряженно-деформированного состояния углепородного массива на шахтах угольных предприятий.

Отличительной чертой, которой отличается программно-аппаратный комплекс, является возможность выявления небезопасных зон в ближнем уровне (до 50 метров), в то время, как обычные системы позволяли осуществлять мониторинг только средней и дальней областях.

Преимущество системы состоит в том, что она позволяет «видеть» опасные участки не только в средней и дальней зонах видения горных работ, но и в ближней – на уровне до 50 метров. В случае выяснения о возникновении на таком расстоянии данных о возможной угрозе, персонал шахты может прекратить продолжение ведения работ и принято решение об изменении приема работ, либо об управлении горным массивом посредством его разгрузки [26]. Разработанный комплекс обладает сертификатом Ростехнадзора и проходит апробацию на угольных предприятиях Урала.

Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ОАО «ППГХО») завершило этап проекта «Геодинамический полигон», направленный на повышение безопасности шахтеров, работающих на подземных объектах Объединения.

Геодинамический полигон - многоуровневая система мониторинга поведения подземных пород, предназначенная для прогнозирования и предупреждения горных ударов (микроразрывов, приводящих к мгновенному разрушению горных пород, завалу людей). В рамках проекта по всему Стрельцовскому рудному полю, разработку которого осуществляет ППГХО, были установлены датчики наземной GPS-навигации, акустики, сеймики. Поступающая с них информация позволяет определять опасные для производства участки, осуществлять прогнозирование поведения этих участков и принимать меры, направленные на предупреждение несчастных случаев. В случае опасности повышенного горного давления сигнал датчиков позволит работающим в шахте горнякам вовремя выйти на поверхность без риска для жизни.

Реализация проекта «Геодинамический полигон» стартовала на объектах ППГХО в 2010 году. Помимо специалистов Уранового холдинга

«АРМЗ» и ОАО «ППГХО» в нем принимают участие представители Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Кольского научного центра, Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, института солнечно-земной физики СО РАН и других научных предприятий [27].

«В систему включен новый прибор - лазерный деформограф, установленный на руднике «Глубокий». Это очень чувствительный прибор, позволяющий регистрировать предвестники движения горных массивов в радиусе одного километра. Уникальная разработка дает возможность изучить нарастание напряжения в определенных зонах, все данные в режиме онлайн передаются на поверхность, где анализируются специалистами участка прогноза и предотвращения горных ударов. То есть, уже на стадии планирования горных работ, основываясь на данных системы контроля горного давления, исключается возможность создания опасных ситуаций.

#### **1.4 Обзор методов определения маршрута**

Задача кратчайшего маршрута (shortest path problem) определяется как проблема поиска самого короткого пути между двумя точками графа. Кратчайший или геодезический путь  $d(u,v)$  в графе  $G$  представляет собой путь наименьшей длины простой цепи, соединяющий вершины  $u$  и  $v$ . Простой цепью называется чередующаяся последовательность вершин и ребер, в котором все вершины (а следовательно, и ребра) различны [37]. На сегодняшний день существует множество алгоритмов нахождения геодезического пути. Эта задача является одной из важнейших классических задач теории графов. Оптимальность большинства существующих алгоритмов определяется структурой графа, для которого применяется алгоритм, поскольку, как правило сами алгоритмы изначально разработаны для поиска пути в графах определенного типа.

## Алгоритм поиска A\*

A\* пошагово просматривает все пути, ведущие от начальной вершины в конечную, пока не найдёт минимальный. Как и все информированные алгоритмы поиска, он просматривает сначала те маршруты, которые «кажутся» ведущими к цели. От жадного алгоритма, который тоже является алгоритмом поиска по первому лучшему совпадению, его отличает то, что при выборе вершины он учитывает, помимо прочего, весь пройденный до неё путь. Составляющая  $g(x)$  — это стоимость пути от начальной вершины, а не от предыдущей, как в жадном алгоритме [100].

В начале работы просматриваются узлы, смежные с начальным; выбирается тот из них, который имеет минимальное значение  $f(x)$ , после чего этот узел раскрывается. На каждом этапе алгоритм оперирует с множеством путей из начальной точки до всех ещё не раскрытых (листовых) вершин графа — множеством частных решений, — которое размещается в очереди с приоритетом. Приоритет пути определяется по значению  $f(x) = g(x) + h(x)$ . Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока значение  $f(x)$  целевой вершины не окажется меньшим, чем любое значение в очереди, либо пока всё дерево не будет просмотрено. Из множества решений выбирается решение с наименьшей стоимостью.

Временная сложность алгоритма A\* зависит от эвристики. В худшем случае, число вершин, исследуемых алгоритмом, растёт экспоненциально по сравнению с длиной оптимального пути, но сложность становится полиномиальной, когда эвристика удовлетворяет следующему условию:

$$|h(x) - h^*(x)| < O(\log h^*(x)) \quad (1.8)$$

где  $h^*$  — оптимальная эвристика, то есть точная оценка расстояния из вершины  $x$  к цели. Другими словами, ошибка  $h(x)$  не должна расти быстрее, чем логарифм от оптимальной эвристики.

Чем меньше эвристика  $h(x)$ , тем больше приоритет, поэтому для реализации очереди можно использовать сортирующие деревья.

## Алгоритм Дейкстры

Алгоритм на графах, изобретённый нидерландским учёным Эдсгером Дейкстрой в 1959 году. Находит кратчайшие пути от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм работает только для графов без рёбер отрицательного веса. Алгоритм широко применяется в программировании и технологиях, например, его используют протоколы маршрутизации OSPF и IS-IS[38].

Каждой вершине  $V$  из графа  $G$  устанавливается метка, характеризующая минимальное известное расстояние от этой вершины до вершины начала. Алгоритм работает пошагово — на каждом шаге алгоритм переходит в очередную не посещённую вершину и вычисляет расстояние до неё от стартовой вершины. Работа алгоритма считается завершённой, когда будут помечены все вершины графа.

Таким образом, алгоритм состоит из двух ключевых частей — одноразовой операции «начало» и повторяемой операции «шаг». На операции «начала» указывается начальная вершина с меткой равной 0. Метки остальных вершин принимают равным бесконечности — это в последствии упростит задачу поиска минимального пути и сообщит оператору перебора о не посещённой точке. После «начала» запускается повторяемая процедура «шаг». Из не посещённых вершин выбирается вершина  $u$ , имеющая минимальную метку. Вычисляются расстояния всех возможных маршрутов, в которых вершина  $u$  является предпоследним пунктом. Для каждой вершины, в которую ведут ребра из  $u$ , кроме отмеченных как посещённые, вычисляется длину маршрута, равную сумме значений текущей метки  $u$  и длины ребра, соединяющего  $u$  с её соседом. Если полученное значение длины меньше значения метки соседа, значение метки заменяется полученным значением длины. Рассмотрев всех соседей, вершину  $u$  помечается как посещённая, после чего шаг алгоритма повторяется. Если все вершины графа посещены, то алгоритм завершается.

Сложность алгоритма Дейкстры зависит от способа нахождения вершины  $v$ , а также способа хранения множества не посещённых вершин и способа обновления меток. Обозначим через  $n$  количество вершин, а через  $m$  — количество рёбер в графе  $G$ . В простейшем случае, когда для поиска вершины с минимальным  $d[v]$  просматривается всё множество вершин, а для хранения величин  $d$  используется массив, время работы алгоритма есть  $O(n^2)$ . Основной цикл выполняется порядка  $n$  раз, в каждом из них на нахождение минимума тратится порядка  $n$  операций. На циклы по соседям каждой посещаемой вершины тратится количество операций, пропорциональное количеству рёбер  $m$  (поскольку каждое ребро встречается в этих циклах ровно дважды и требует константное число операций). Таким образом, общее время работы алгоритма  $O(n^2+m)$ , но, так как  $m \leq n(n-1)$ , оно составляет  $O(n^2)$ .

### **Алгоритм «разделяй и властвуй»**

Идея алгоритма заключается в разбиении множества маршрутов заключающаяся в рекурсивном разбиении решаемой задачи на две или более подзадачи того же типа, но меньшего размера, и комбинировании их решений для получения ответа к исходной задаче. Разбиения выполняются до тех пор, пока все подзадачи не окажутся элементарными [40].

В случае с задачей нахождения кратчайшего пути связи графа анализируется для нахождения точки, разделяющей конечную и начальную примерно одинаковым расстоянием. После этого происходит рекурсивная декомпозиция задачи до нахождения оптимального пути.

Трудоёмкость алгоритма в худшем случае составляет  $n \cdot \log(n)$ , где  $n$  — количество вершин графа

### **Алгоритм волновой трассировки**

Алгоритм чаще всего применяется для поиска кратчайшего пути на планарном графе. Принадлежит к алгоритмам, основанным на методах поиска в ширину.

В основном используется при компьютерной трассировке (разводке) печатных плат, соединительных проводников на поверхности микросхем.

Волновой алгоритм в контексте поиска пути в лабиринте был предложен Э. Ф. Муром [39]. Ли независимо открыл этот же алгоритм при формализации алгоритмов трассировки печатных плат в 1961 году [41,42].

Алгоритм работает на дискретном рабочем поле (ДРП), представляющем собой ограниченную замкнутой линией фигуру, не обязательно прямоугольную, разбитую на прямоугольные ячейки, в частном случае — квадратные. Множество всех ячеек ДРП разбивается на подмножества: «проходимые» (свободные), т. е. при поиске пути их можно проходить, «непроходимые» (препятствия), путь через эту ячейку запрещён, стартовая ячейка (источник) и финишная (приемник). Назначение стартовой и финишной ячеек условно, достаточно — указание пары ячеек, между которыми нужно найти кратчайший путь.

Алгоритм предназначен для поиска кратчайшего пути от стартовой ячейки к конечной ячейке, если это возможно, либо, при отсутствии пути, выдать сообщение о непроходимости [38].

Работа алгоритма включает в себя три этапа: инициализацию, распространение волны и восстановление пути.

Во время инициализации строится образ множества ячеек обрабатываемого поля, каждой ячейке приписываются атрибуты проходимости/непроходимости, запоминаются стартовая и финишная ячейки. Далее, от стартовой ячейки порождается шаг в соседнюю ячейку, при этом проверяется, проходима ли она, и не принадлежит ли ранее меченной в пути ячейке. Соседние ячейки принято классифицировать двояко: в смысле окрестности Мура и окрестности фон Неймана, отличающийся тем, что в окрестности фон Неймана соседними ячейками считаются только 4 ячейки по вертикали и горизонтали, в окрестности Мура — все 8 ячеек, включая диагональные.

При выполнении условий проходимости и непринадлежности её к ранее помеченным в пути ячейкам, в атрибут ячейки записывается число, равное количеству шагов от стартовой ячейки, от стартовой ячейки на первом шаге это будет 1. Каждая ячейка, помеченная числом шагов от стартовой ячейки, становится стартовой и из неё порождаются очередные шаги в соседние ячейки.

Восстановление кратчайшего пути происходит в обратном направлении: при выборе ячейки от финишной ячейки к стартовой на каждом шаге выбирается ячейка, имеющая атрибут расстояния от стартовой на единицу меньше текущей ячейки. Очевидно, что таким образом находится кратчайший путь между парой заданных ячеек [38].

Вычислительная сложность волнового алгоритма близка к  $O(n^2)$ , где  $n$  – число вершин. В реальных задачах, например, при трассировке печатных плат, определение маршрута выполняется многократно, что влечет существенные временные затраты.

### **Алгоритм поворота Креша**

Алгоритм поворота Креша применим для ситуаций, обусловленных несколькими проблемами:

- окружающий мир, в котором необходимо рассчитать оптимальный маршрут может значительно меняться
  - передвижение в пространстве возможно в любом направлении и на любое расстояние (свыше окрестности мура)
  - необходимо учесть одновременное передвижение нескольких объектов с учетом их размеров и размеров пространства пути (например, последовательное передвижение крупногабаритной техники по узкому мосту).
- В этом случае основной упор делается не на формализацию пространства в виде графа, а на обозначение препятствий некоторой в виде фигуры неправильной формы (mesh).

В начале выполнения алгоритма задается прямой отрезок между стартом и финишем - это лучшее возможное решение. Затем на этом отрезке находится первый вход в препятствие. Для обхода препятствия применяется «правило лабиринта»: если постоянно двигаться вдоль стены в одном направлении, то через некоторое время произойдет возврат в точку начала обхода. Обход может быть двух типов: обход препятствия, движение внутри замкнутого пространства вдоль стены. Во втором случае решения нет - точка финиша недоступна. В первом случае есть два варианта: во время обхода препятствия было обнаружено место выхода отрезка из препятствия, и точки выхода обнаружено не было. Если точки не было, значит, финиш находится внутри препятствия, а попасть туда невозможно - решения нет. Если точка была обнаружена, значит продолжить поиск, обходя следующее препятствие. Обходить каждое препятствие следует с двух сторон.

Обойдя по контуру все препятствия на пути, можно уверенно сказать, что среди всего маршрута обхода присутствует одно место, которое точно входит в самый кратчайший путь - это было бы лучшим решением. Найденная точка считается решением пути и делит путь на 2 части. Далее для каждой части пути нужно снова рекурсивно выполнить поиск.

Если после обхода не удалось найти выход из последнего препятствия, значит, решения нет, и построить путь к финишу невозможно[43].

Вычислительная сложность навигационной сетки зависит от структуры данных и количества препятствий, возникающих на пути. Помимо этого, на продолжительность влияет топология препятствий: например, для U-образных препятствий алгоритм будет показывать самый худший результат. Существует технология, позволяющая индексировать точки входа и выхода из препятствий. Благодаря индексации сложность нахождения маршрута близка к  $O(n^2)$ , где  $n$  – количество препятствий.

Поскольку горные выработки преобразованы в вид неориентированного взвешенного графа, целесообразно применить два алгоритма: алгоритм Дейкстры и алгоритм  $A^*$ . Первый всегда со 100% вероятностью находит

самый оптимальный путь, в то время как  $A^*$  может дать не самый оптимальный путь, однако работает в несколько раз быстрее. В связи с этим при первичном просчете целесообразно применять алгоритм Дейкстры, если же в случае выхода из шахты путь окажется заблокирован, лучше применять алгоритм  $A^*$ , так как скорость принятия решения в данном случае будет приоритетна.

### **Выводы по главе**

Анализ существующих проблем в области ведения аварийно-спасательных работ выявил необходимость в создании собственной методики нахождения рационального маршрута выхода на поверхность с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестностях горных выработок. Проведён анализ алгоритмов определения кратчайшего пути в неориентированном взвешенного графе. Выявлена целесообразность применения алгоритма Дейкстры, модифицированного для применения в горных выработках в аспекте используемых значений весов ребер. Современные вычислительные мощности упрощают возможность применения данного алгоритма на графах с большой топологией, что также делает его использование возможным при моделировании ситуации блокировки выработок, и, как следствие, необходимости пересчета всех маршрутов, использовавших эту выработку в своем составе.

## **2 Математическое обеспечение геоинформационного моделирования маршрутов эвакуации**

### **2.1 Геоинформационная модель маршрутов эвакуации из угольных шахт**

Для решения задачи нахождения оптимального маршрута была разработана линейная математическая модель, состоящая из нескольких частей (рис.4).

Каждый элемент структуры использует в качестве входных данных результат выполнения предыдущего, таким образом, выполнение следующего этапа невозможно без окончания расчетов на предыдущем.

Помимо этого, каждый элемент структуры содержит уникальный набор входных характеристик, необходимый для уменьшения степени абстракции моделируемого объекта:

- атрибутивно-пространственная модель углепородного массива, ослабленного выработками: использует данные геологоразведочных работ (результат анализа керна) для пространственной интерполяции физико-механических свойств горного массива.

- конечно-элементная модель ослабленного массива: строится путем разбиения атрибутивно-пространственная модель углепородного массива на конечные элементы конфигурируемого типа и размера.

- напряженно-деформированное состояние: вычисляется в результате анализа конечно-элементной модели для краевой задачи, определяемой уравнениями равновесия и краевыми условиями.

- области опасного напряжения: находятся в результате OLAP-анализа, который в качестве входных данных использует функцию принадлежности и индекс соответствия для каждого физико-механического свойства.



Рисунок 4 - Структурная схема формирования маршрута эвакуации

- возможные маршруты эвакуации: рассчитывается оптимальный маршрут на основе оценки уровня безопасности и совокупности ограничений, установленных нормативными актами федерального уровня.

## **2.2 Пространственно-атрибутивная модель углеродного массива с горными выработками**

Технология построения атрибутивно-пространственной модели углеродного массива, ослабленного выработками состоит из нескольких этапов [55]:

- систематизация и структуризация сведения о геологоразведочных работах;
- построение трехмерной модели углеродного массива, путем пространственной интерполяции геологоразведочных данных;
- построение дискретной модели горных выработок.

На первом этапе необходимо обработать исходные данные, представленные в виде чертежей горных выработок и проектной геологической документацией и представить их в виде табл. 2.

Для каждой разведочной скважины, помимо пространственных данных о геометрии, описываются следующие сведения: тип породы, глубина и мощность залегания каждого пласта (табл. 3).

Таблица 2

Формат сведений о геологоразведочных скважинах

Номер скважины	Координаты скважины (или географические координаты)		Глубина скважины, м	Высотная отметка устья (уровня земной поверхности, где начали бурить), м
1	327,5	17,5	500	150
2	127,5	117,5	600	25
...	...	...	...	...

После построения геометрической модели углепородного массива, разведочные данные объединяются с базой данных физико-механических свойств горных пород в хранилище данных, структура которого представлена на рис. 5. При использовании хранилища данных целесообразно применение специализированной технологии обработки данных. Поскольку необходимо обрабатывать большой объем данных, целесообразно использовать OLAP-технологии, которая применяется для агрегирования сведений и представления их в виде многомерного гиперкуба данных.

Поскольку результаты запроса (агрегаты) необходимо многократно использовать на различных стадиях проведения анализа, их необходимо хранить в отдельных таблицах, созданных внутри хранилища данных.

Это увеличит быстродействие работы при увеличении объема занимаемого места, что в целом увеличит эффективность работы системы. Таким образом, целесообразно применять гибридную технологию OLAP (HOLAP), которая использует реляционные таблицы для хранения базовых данных и многомерные таблицы для агрегатов. С каждым агрегатом дополнительно сохраняется тайм-код и номер расчета - это обеспечит оперативный доступ к результатам для построения хронологических рядов, отображающих динамику изменения исследуемой характеристики.

Таблица 3

Формат сведений по каждой скважине

Номер скважины	Породы в скважине		
1	Глубина начала залегания породы, м	Порода	Мощность, м
	500	Аргиллит	50
	450	Алевролит	300
	150	Уголь	5
	123	Глина	100
	...	...	...
2	600	Аргиллит	70
	530	Алевролит	300
	230	Уголь	12
	...	...	....

Хранилища данных с реализованной HОLAP обеспечат возможность создания витрин данных, каждая из которых представляет собой срезы данных по OLAP-гиперкубу: массив узконаправленных сведений, который ориентирован на конкретную группу специалистов или на исследование конкретного сегмента модели[56].

Временной характер хранилища данных (рис.6) обусловлен необходимостью сопоставления нескольких витрин, привязанных к временам обновления модели топологии горных выработок. Частота обновления составляет 5-9 итераций в месяц, что позволяет поддерживать модель в актуальном состоянии на протяжении всего процесса ведения горных работ за счет корректировки данных о расположении пикетов.

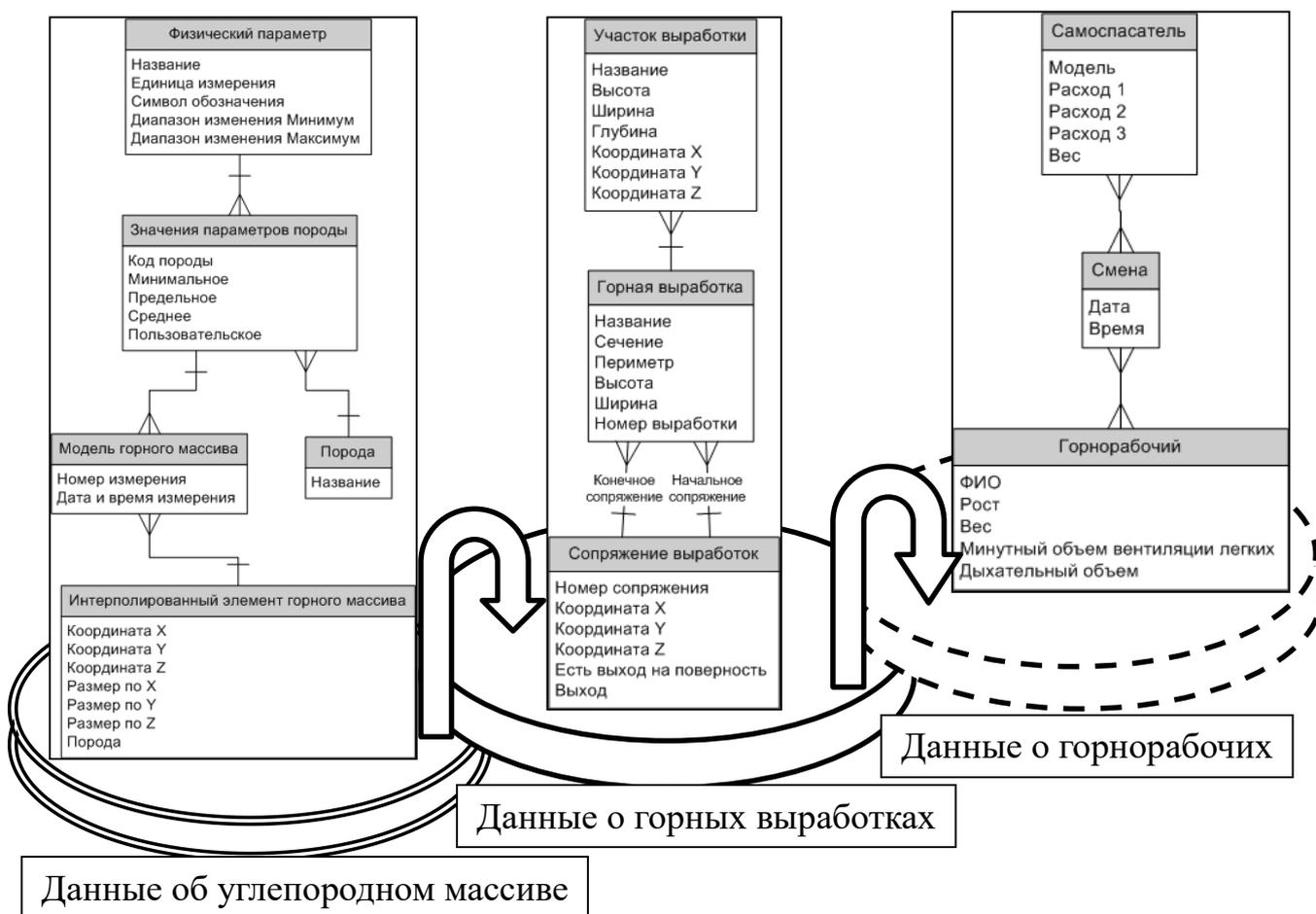


Рисунок 5 - Витрина хранилища данных об угольной шахте

При построении хранилища данных возникает необходимость в обработке временных данных, для чего требуется использование эффективного метода анализа данных, позволяющего работать с несколькими временными срезами и поддерживать актуальное состояние модели в отдельной сущности. В данном случае, целесообразно использовать OLAP-технологии, которая позволяет агрегировать пространственные-атрибутивные сведения и представить их в виде многомерного гиперкуба данных. Поскольку результаты запроса (агрегаты) будут необходимы на стадии проведения анализа, их необходимо хранить в отдельных таблицах хранилища данных. Это увеличит быстродействие работы за счет увеличения объема занимаемого места, что в целом увеличит эффективность работы системы. Таким образом, целесообразно применять гибридную технологию OLAP (HOLAP), которая использует реляционные таблицы для хранения базовых данных и многомерные таблицы для агрегатов.

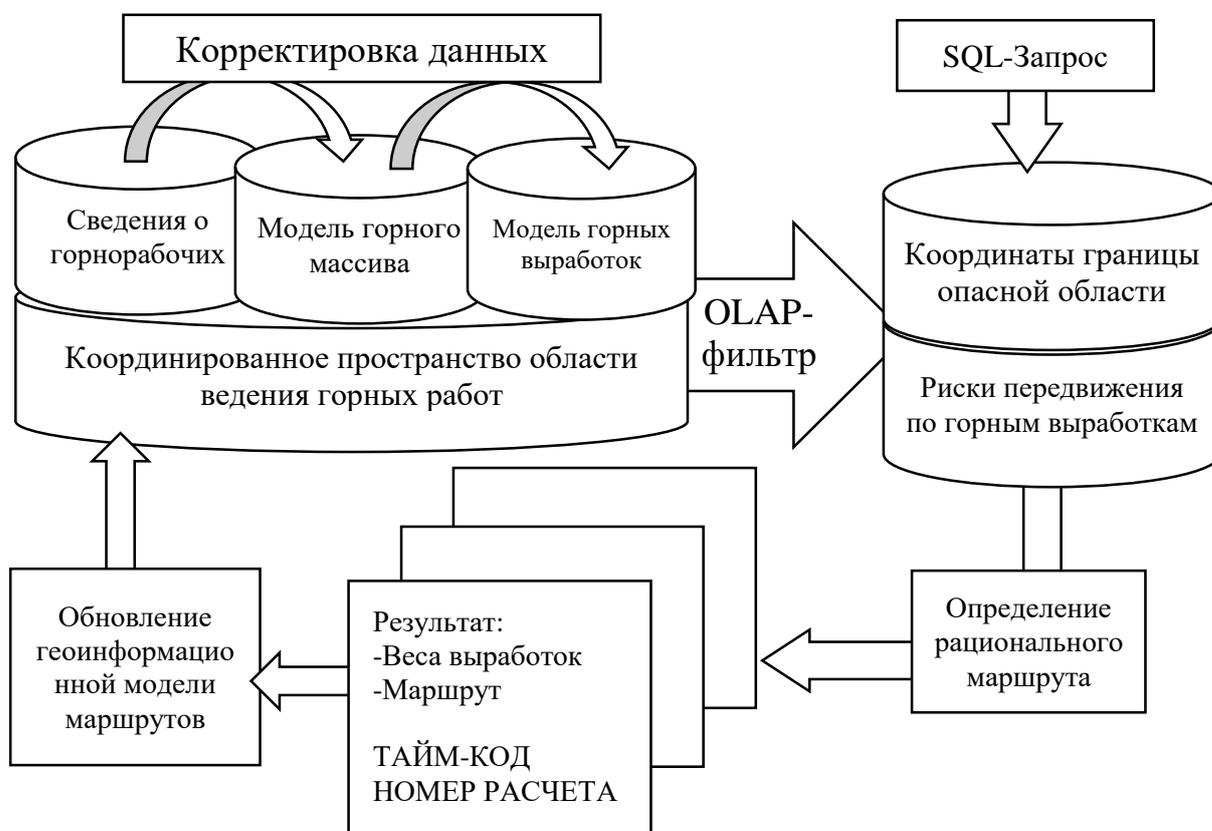


Рисунок 6 – Модель временного хранилища данных маршрутов эвакуации

С каждым агрегатом, в соответствии с временной технологией хранения данных, сохраняется тайм-код и номер расчета - это обеспечит возможность механизмам СУБД сопоставлять агрегаты между собой для построения актуализированной модели. Хранилища данных, благодаря реализованной технологии HОLAP, обеспечат возможность создания витрин данных, каждая из которых представляет собой срез данных по OLAP-гиперкубу, содержащих обновленные сведения для построения маршрута.

После того как сформировано хранилище данных начинается второй этап – интерполяция геологоразведочных скважин[93]. Целью этого этапа является построение трехмерной модели углепородного массива на основе массива разведочных данных (рис.7).

Геологические разведочные работы не позволяют получить полные сведения об углепородном массиве: во-первых, стоимость подробной разведки высока, а во-вторых, даже в случае подробной разведки расположение пластов породы между разведочными скважинами будет неизвестно.

Для восполнения недостающих атрибутивных данных целесообразно использование пространственной интерполяции. В качестве метода для интерполяции геометрии пластов был выбран метод Обратных Взвешенных Расстояний (IDW) [82]. Идея этого метода заключается в уменьшении веса по мере увеличения расстояния от неизвестной точки:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot Z(S_i), \quad (2.1)$$

где  $\hat{Z}$  - искомое значение для точки  $S_0$  ;

$\lambda_i$  - веса, присвоенные каждой опорной точке, из числа тех, которые будут использованы в вычислениях. Эти веса уменьшаются с расстоянием;

$Z(S_i)$ - известное значение в точке  $S_i$  ;

$N$  - число опорных точек, находящихся в окрестности искомой точки и используемых в вычислениях.

Веса определяются по следующей формуле:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad (2.2)$$

где:  $d_{i0}$  - это расстояние между искомой точкой  $S_0$ , и  $i$ -той опорной точкой,  $S_i$ .

С увеличением расстояния вес уменьшается за счет коэффициента  $p$ .

Параметр степени  $p$  влияет на присвоение весов опорным точкам; это означает, что по мере того, как увеличивается расстояние между опорными точками и искомой точкой, влияние (или вес), которое опорная точка будет оказывать на искомую точку, уменьшается по экспоненте.

Сумма весов опорных точек, которые будут использованы при выполнении интерполяции, должна быть равна 1:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2.3)$$

Оптимальное значение  $p$  определяется путем минимизации среднеквадратичной ошибки вычислений (RMSPE). Значение среднеквадратичной ошибки является статистической величиной и рассчитывается при перекрестной проверке. При перекрестной проверке каждая опорная точка исключается из вычислений и сравнивается с проинтерполированным значением для этого местоположения.

Для повышения точности трехмерной модели интерполируются и физико-механические свойства: вместо усреднения значений коэффициента Пуассона и модуля упругости для всего пласта осуществляется усреднение по ближайшим выработкам. Соответственно для коэффициента Пуассона:

$$v_k(\vec{r}) = \frac{\sum_i^{n_k} v_i \lambda_i}{n_k}. \quad (2.4)$$

Для модуля упругости:

$$E_k(\vec{r}) = \frac{\sum_i^{n_k} E_i \lambda_i}{n_k}, \quad (2.5)$$

где  $\vec{r}$  – радиус вектор,

$n$  – количество ближайших разведочных скважин от интерполируемого элемента  $k$ .

Дополнительно при моделировании применяется ряд правил и допущений:

- пространство между разведочными скважинами занимает порода, т.е. пренебрегается вероятностью наличия тектонических нарушений в пласте;
- моделируемые пласты считаются пологими, т.е. угол падения пласта не может превышать 30 градусов;
- прослойки меньше десяти сантиметров не учитываются;
- порода считается однородной и изотропной.

В результате формируется трехмерная модель углепородного пласта, полученная с помощью интерполяции геологоразведочных скважин (рис. 7).

На третьем этапе осуществляется построение дискретной модели горных выработок. Обрабатываются узловые данные (координаты) и данные о сопряжении горных выработок (начальный и конечный узел выработки).

Горные выработки структурируются и преобразуются в вид неориентированного взвешенного графа [101]. Для удобства работы с графом целесообразно его визуализировать (рис. 8). Для визуализации дискретной модели был применен алгоритм разворачивания графов Эйджеса [101]. Вершины графа  $G$  рассматриваются как стальные шары, соединенные пружинами.

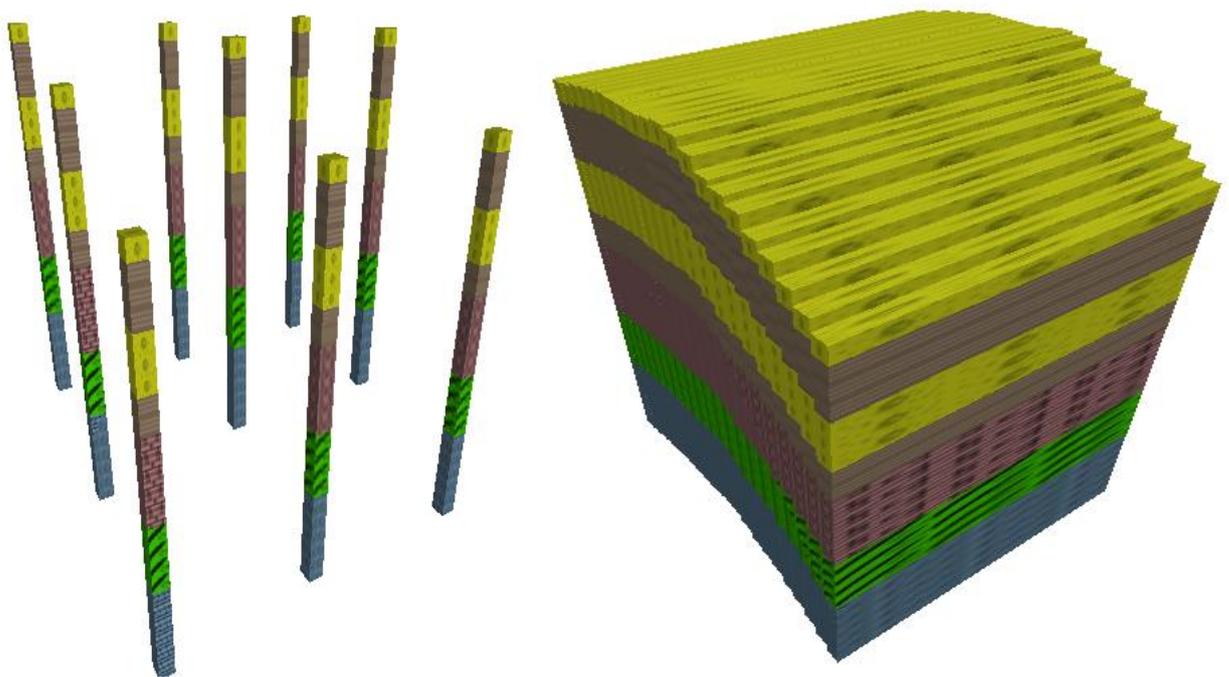


Рисунок 7 - Интерполяция разведочных данных

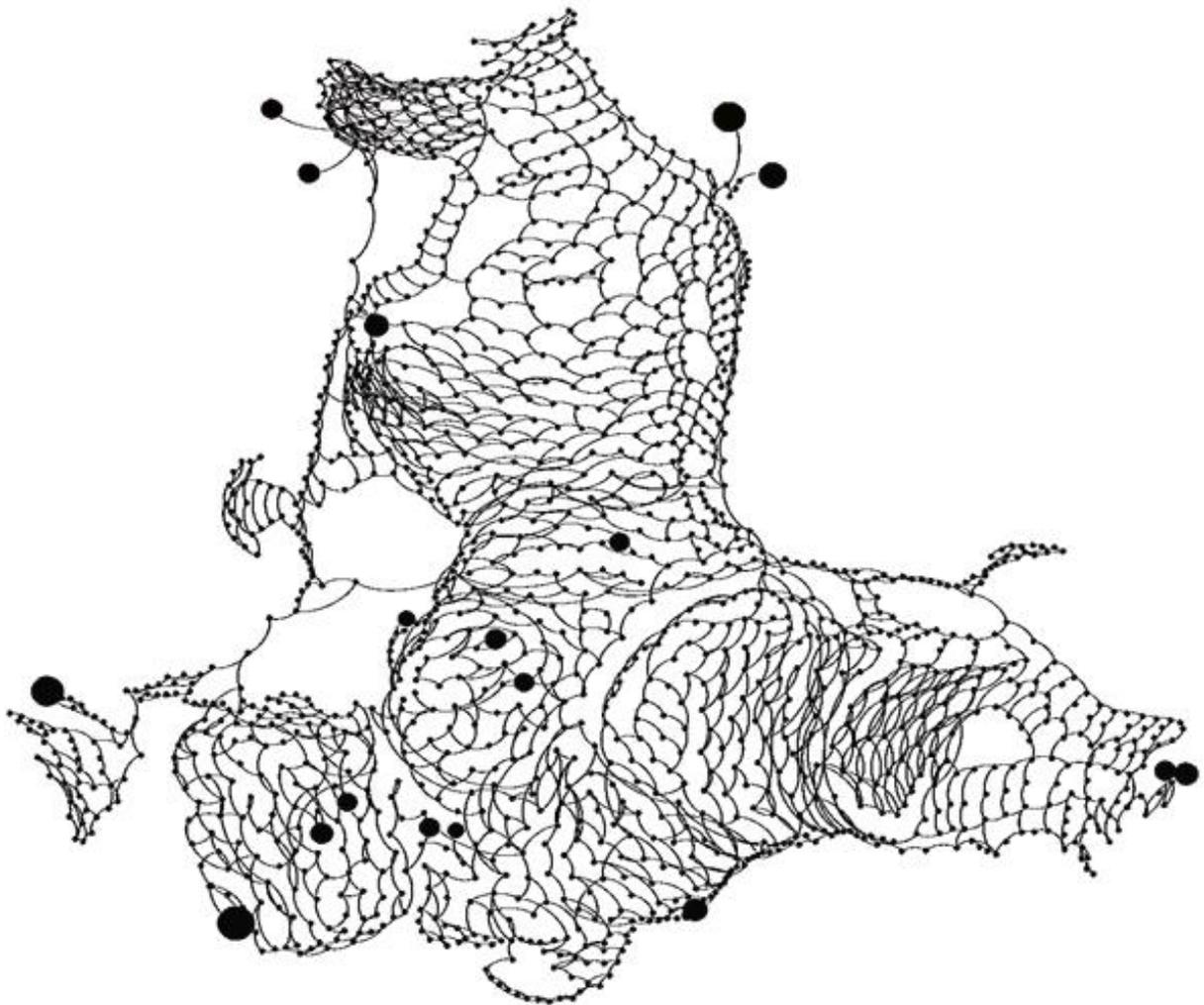


Рисунок 8 - Визуализация дискретной модели выработок

Позиция каждой вершины описывается вектором  $p$

$$f_{\text{пруж}}(p_u, p_v) = c_{\text{пруж}} \log \frac{\|p_u - p_v\|}{l} \overrightarrow{p_u \cdot p_v}, \quad (2.6)$$

где  $l$  – «идеальная длина» пружины.

В модели считается, что на каждую пару вершин, связанных ребром действует сила пружины, а на каждую пару несмежных вершин действует сила отталкивания.

$$f_{\text{отталк}}(p_u, p_v) = \frac{c_{\text{отталк}}}{\|p_u - p_v\|^2} \overrightarrow{p_u \cdot p_v}, \quad (2.7)$$

$c_{\text{пруж}}$ ,  $c_{\text{отталк}}$  - настраиваемые коэффициенты.

После построения пространственно-атрибутивной модели горных выработок необходимо провести анализ напряженно-деформированного анализа для определения зон с предельным напряжением.

## 2.3 Построение конечно-элементной модели ослабленного массива

В теоретическом плане горная геомеханика основывается на принципах механики деформируемого твердого тела. Поэтому при решении задачи деформирования горных пород используются основные соотношения линейной теории упругости [45].

### Постановка задачи определения НДС массива горных пород

Для решения пространственной задачи деформирования углепородного массива в окрестности сопряжений горных выработок сформулируем прямую задачу теории упругости [48]: по заданным условиям на поверхности тела (заданы поверхностные силы или перемещения граничной поверхности тела) определить тензоры напряжений и деформаций в любой точке тела и поле перемещений граничных и внутренних точек.

Обозначим  $T_\sigma$  - тензор напряжений,  $T_\varepsilon$  - тензор деформаций [50]:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}, T_\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & 0.5\gamma_{xy} & 0.5\gamma_{xz} \\ 0.5\gamma_{xy} & \varepsilon_y & 0.5\gamma_{yz} \\ 0.5\gamma_{xz} & 0.5\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{vmatrix}. \quad (2.8)$$

Обозначим  $Div$  - дивергенцию векторного поля  $a$  в точке  $x, y, z$ ,  $\nabla$  - оператор дифференцирования по координатам  $x, y, z$ :

$$Div a = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}, \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2.9)$$

Рассмотрим бесконечно малый объёмный элемент. Для решения поставленной задачи применяются три группы уравнений механики сплошной среды [49]:

- статические - уравнения равновесия

$$div T_\sigma + P = 0 \quad (2.10)$$

где  $div T_\sigma$  - дивергенция векторного поля  $T_\sigma$ ;

$P$  - распределённые (объёмные) силы

Уравнения равновесия (2.10) должны выполняться в любой внутренней точке тела. Кроме того, необходимо учесть условия равновесия на границе тела

$$U|_{\Gamma} = U_0 \quad (2.11)$$

где  $U$  - перемещения на границе тела ( $\Gamma$ );

- геометрические - уравнения совместности и непрерывности деформаций

$$T_{\varepsilon} = \nabla U \quad (2.12)$$

- физические - уравнения, связывающие компоненты напряжения и деформаций, соответствующие изменению формы

$$T_{\sigma} = DT_{\varepsilon} \quad (2.13)$$

где  $D$  - матрица упругости, в которой физические свойства тела задаются двумя упругими характеристиками постоянными во всех точках изотропного тела: модулем продольной или поперечной упругости  $\mu$  и коэффициентом поперечного расширения  $\nu$ . В случае анизотропного тела упругие характеристики, изменяющиеся при переходе от одной точки к другой, являются функциями координат точки [34].

Существуют следующие аналитические методы решения приведенных групп уравнений [50]:

- метод перемещений - за неизвестные принимаются перемещения:

$$u = f_1(x, y, z), \quad v = f_2(x, y, z), \quad w = f_3(x, y, z). \quad (2.14)$$

Для того, чтобы найти значения  $u$ ,  $v$ ,  $w$  необходимо в физические уравнения подставить геометрические соотношения и затем полученные выражения подставить в уравнения равновесия. В результате чего будем иметь:

$$\psi_1(u, v, w) = 0, \quad \psi_2(u, v, w) = 0, \quad \psi_3(u, v, w) = 0. \quad (2.15)$$

- метод сил - за неизвестные принимаются напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \Phi_1(x, y, z), \quad \sigma_y = \Phi_2(x, y, z), \quad \sigma_z = \Phi_3(x, y, z), \\ \tau_{xy} &= \Phi_4(x, y, z), \quad \tau_{yz} = \Phi_5(x, y, z), \quad \tau_{zx} = \Phi_6(x, y, z). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для нахождения решения используются уравнения неразрывности деформаций. При помощи статических и геометрических уравнений можно получить уравнения в форме:

$$F_1(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}) = 0, \dots, F_6(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}) = 0 \quad (2.17)$$

- смешенный метод - за неизвестные принимаются некоторые перемещения и некоторые напряжения.

В данной работе использовался метод перемещений. Точное решение прямой задачи заключается в непосредственном интегрировании уравнений (2.15). Основные трудности заключаются в точном удовлетворении решения (2.14) граничным условиям (2.11). Поэтому для нахождения решения с заданной степенью точности можно использовать приближенные методы.

### **Применение метода конечных элементов для расчета НДС углепородного массива**

Наиболее адаптивным к условиям данной задачи является метод конечных элементов, который позволяет описывать объекты сложной конфигурации путём наложения неравномерной сетки, а также учитывать слоистость нелинейного массива горных пород. Кроме того, МКЭ характеризуется хорошими численными характеристиками матриц, так как получаемая в процессе решения матрица системы линейных алгебраических уравнений является разреженной матрицей ленточного типа, что существенно ускоряет процедуру решения системы уравнений и уменьшает объем требуемой оперативной памяти.

Метод конечных элементов (МКЭ) является эффективным численным методом для решения широкого круга краевых задач механики сплошной среды [32]. Следует отметить такие возможности МКЭ, как расчет НДС тел из нескольких материалов с нерегулярными границами, сгущение сетки в местах ожидаемой концентрации напряжений, учет различных граничных условий. Кроме того, МКЭ достаточно просто можно адаптировать к сложной форме

системы пересекающихся горных выработок путем соответствующего разбиения.

МКЭ основан на замене исследуемого объекта совокупностью конечного числа дискретных элементов, связанных между собой в узлах. В узлах элементов определяются зависимости между усилиями и перемещениями. Затем составляется и решается система алгебраических уравнений, и определяются компоненты напряженно-деформированного состояния объекта [33].

Для решения пространственной задачи определения НДС углепородного массива используются дифференциальные уравнения равновесия, соотношения, связывающие деформации с перемещениями и уравнения состояния материала [35]. Кроме того, для любого тела, имеющего конечные размеры, системы уравнений дополняются граничными условиями.

Для дифференциальных уравнений, связывающих деформации с перемещениями (2.12), при решении задачи МКЭ необходимо учитывать, что движение тела выделяется как твердое целое. Выражения для деформаций не содержат такого движения, однако оно фигурирует в перемещениях [36]. Следовательно, при определении деформаций путем дифференцирования перемещений из соотношений исключается движение тела как твердого целого.

Так как конечно-элементная модель строится на основе задаваемых априори функций перемещения, то количество независимых параметров, с помощью которых описывается деформированное состояние в элементе, меньше количества параметров, задающих перемещения на число степеней свободы элемента как твердого тела [51].

С другой стороны, в трехмерных задачах шесть компонент деформации выражаются через три компоненты перемещения. Следовательно, ни в одном из этих случаев уравнения (2.12) не имеют единственного решения. Необходимы дополнительные уравнения, которые можно вывести из условия совместности, с учетом того, что компоненты перемещения должны быть

однозначными непрерывными функциями. Для этого достаточно последовательно продифференцировать  $Y_{xy}$  по  $x$  и по  $y$ ,  $Y_{yx}$  по  $y$  и по  $x$ ,  $Y_{yx}$  по  $x$  и по  $z$ , что приведет к системе из шести уравнений вида.

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}. \quad (2.18)$$

Уравнения состояния для материала (2.13), которые в данном случае относятся только к механическим характеристикам материала, задаются путем указания полного набора коэффициентов, связывающих каждую компоненту напряжения со всеми компонентами деформаций. Затем, из соображений симметрии и учета свойств материала число коэффициентов уменьшают таким образом, чтобы они отвечали соответствующим механическим характеристикам среды. Для построения зависимостей составляется матрица жесткости материала [D]. Важным свойством матрицы жесткости материала является ее симметричность [52].

На втором этапе задаются нагрузки, источники, характеристики материалов и другие величины, которые позволяют вычислить элементарные матрицы. Затем из элементарных матриц строится глобальная матрица жесткости. Граничные условия задаются по образующим фигуры и учитываются при сборке глобальной матрицы. 1. Функции смещения. На рис. 9 изображен тетраэдральный элемент  $iklp$  с координатами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Смещение в точке определяется с помощью трех компонентов смещения  $u$ ,  $V$  и  $w$  в направлении трех координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  [53]

$$f = \{u, v, w\}^T \quad (2.19)$$

Линейные изменения описываются с помощью четырех узловых величин (рис. 9).

Приравнивая величины смещения в узлах, получаем 4 уравнения:

$$\begin{aligned} u_1 &= \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1 + \alpha_4 z_1 \\ u_2 &= \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2 + \alpha_4 z_2 \\ u_3 &= \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3 + \alpha_4 z_3 \\ u_4 &= \alpha_1 + \alpha_2 x_4 + \alpha_3 y_4 + \alpha_4 z_4 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Отсюда можно найти  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . Это решение может быть записано с помощью определителя, т. е.

$$u = \{(a_i + b_i x + c_i y + d_i z)u_i + (a_k + b_k x + c_k y + d_k z)u_k + (a_l + b_l x + c_l y + d_l z)u_l + (a_p + b_{kp} x + c_{kp} y + d_{pz})u_p\}/(6V), \quad (2.21)$$

где

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

Величина  $V$  представляет собой объем тетраэдра. Раскрывая соответствующе определители в форме их алгебраических дополнений, где остальные постоянные определяются с помощью щетлической перестановки индексов в последовательности  $i, k, l, p$  получаем:

$$a_i = \det \begin{vmatrix} x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \\ x_p & y_p & z_p \end{vmatrix}, b_i = -\det \begin{vmatrix} 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \\ 1 & y_p & z_p \end{vmatrix},$$

$$c_i = \det \begin{vmatrix} x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \\ x_p & 1 & z_p \end{vmatrix}, d_i = \det \begin{vmatrix} x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \\ x_p & y_p & 1 \end{vmatrix}. \quad (2.23)$$

Последовательность наименования узлов  $i, k, l, p$  следует правилу «правой руки». В соответствии с ним первые три узла получают индексы в направлении против часовой стрелки, если вести отсчет от последнего узла.

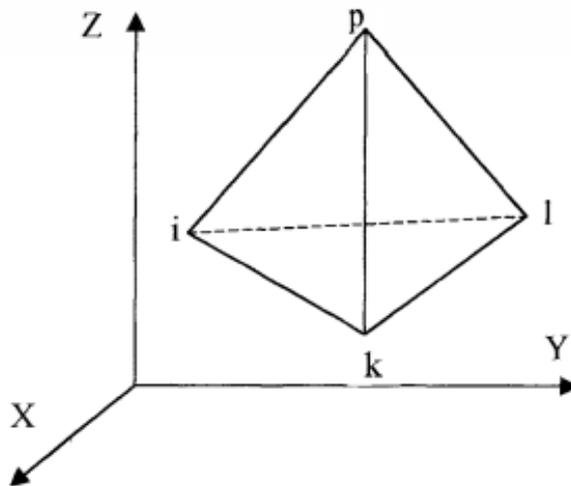


Рисунок 9 - Пространственный элемент в форме тетраэдра

Смещение элемента находим с помощью двенадцати компонентов смещения

$$\{\delta\} = \{\delta_i \delta_k \delta_l \delta_p\}^T \quad (2.24)$$

$$\text{где } \{\delta_i\} = \{u_i v_i w_i\}^T$$

$$\{\delta_k\} = \{u_k v_k w_k\}^T$$

$$\{\delta_l\} = \{u_l v_l w_l\}^T$$

$$\{\delta_p\} = \{u_p v_p w_p\}^T$$

Смещение произвольной точки записывается следующим образом

$$\{f\} = [EN_i, EN_k, EN_l, EN_p]\{\delta\}, \quad (2.25)$$

где E - есть единичная матрица 3x3, а скаляры определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} N_i &= (a_i + b_i x + c_i y + d_i z)/6V \\ N_k &= (a_k + b_k x + c_k y + d_k z)/6V \\ N_l &= (a_l + b_l x + c_l y + d_l z)/6V \\ N_p &= (a_p + b_p x + c_p y + d_p z)/6V \end{aligned} \quad (2.26)$$

Используемые функции смещения в этом случае удовлетворяют требованиям непрерывности на внешней поверхности между различными элементами. Это является прямым следствием линейного характера изменения смещения.

2. Матрица деформации. В трехмерном случае для полного решения достаточно рассмотреть 6 компонентов деформации. Матрица деформации, следуя стандартным обозначениям, может быть определена так

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

С помощью уравнений (2.19) - (2.22) можно установить связь между компонентами смещений и деформации

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\} = [B_i \ B_k \ B_l \ B_p]\{\delta\}, \quad (2.28)$$

$$\text{где } [B_i] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ 0 & d_i & c_i \\ d_i & 0 & b_i \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Другие матрицы получаются таким же образом, меняя местами нужные индексы. Начальные деформации записаны в обычной форме как вектор с шестью компонентами.

3. Матрица жесткости материала. В полностью анизотропном состоянии матрица  $[B]$ , выражающая отношение шести компонентов напряжения к компонентам деформации, может содержать 21 независимую постоянную. Для изотропного материала матрица  $[D]$  записывается с помощью постоянных  $E$  - модуль деформации и  $\nu$  - коэффициент Пуассона. В общем случае имеем

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{xz}\}^T = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}). \quad (2.30)$$

Матрица жесткости напряжения и нагрузки. Матрицы жесткости элементов могут быть явно проинтегрированы, так как компоненты напряжения и деформации в элементе постоянны и, следовательно, могут быть вынесены за знак интеграла. Таким образом, матрица жесткости элемента определяется как

$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dV = [B]^T [D] [B] \int_V dV = [B]^T [D] [B] V, \quad (2.31)$$

где  $V$  - объем элементарного тетраэдра.

Узловые силы, возникающие в результате начальной деформации, определяются следующим образом

$$\{F\}_{\varepsilon_0} = -[B]^T [D] \{\varepsilon_0\} V \quad (2.32)$$

Распределенные массовые силы снова можно представить в функции их компонентов  $X, Y, Z$  или в функции потенциала силы. Причем, если массовые

силы постоянны, то узловые компоненты общей равнодействующей силы окажутся распределенными на четыре равные части.

Глобальная матрица жесткости. Глобальная матрица жесткости  $[K]$  получается суммированием матриц жесткости элементов  $[k]$

$$[K] = \sum[k] \quad (2.33)$$

Напряжения и деформации. Деформации через узловые перемещения вычисляются следующим образом:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\} \quad (2.34)$$

Напряжения в элементах вычисляются по закону Гука

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (2.35)$$

С учётом формулы (2.34) напряжения могут быть выражены через узловые перемещения

$$\{\sigma\} = [D][B]\{U\} - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (2.35)$$

По результатам упругого решения можно выполнить анализ пространственного НДС углепородного массива и вычислить секущие характеристики, связывающие полные напряжения и деформации [92].

В качестве математического программного комплекса для решения задач горного дела в НФИ КемГУ студентами и аспирантами используется комплекс программ «Композит-НК» разработанный под руководством профессора Каледина В.О.

Данный программный комплекс позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние углепородного массива с учетом положения секции механизированной крепи по длине выемочного столба в целях изучения возникновения зон повышенного горного давления для предотвращения аварийных и чрезвычайных ситуаций в очистных забоях угольных шахт [85]. Последовательность работы компонентов программного комплекса представлена на рис. 10 и включает в себя:

- 1) создание структурной модели для МКЭ;
- 2) загрузка исходных данных согласно структурной модели;

- 3) перенумерация узлов для оптимизации расчетов;
- 4) формирование локальных матриц направления и величины сил;
- 5) сборка глобальной матрицы сил;
- 6) составление СЛАУ, подготовка к решению МКЭ;
- 7) решение СЛАУ, нахождение корней;
- 8) вывод результатов в файл stress.lua.

Программы комплекса разработаны на языке C++ в среде Borland Builder и поддерживают открытый код, что обеспечивает простоту его сопровождения и развития. В качестве базы данных программного комплекса используется система структурированных текстовых файлов [54].



Рисунок 10 - Алгоритм работы ПК «Композита-ПК»

Комплекс «Композит НК» содержит следующие компоненты:

- палитра системы визуального программирования;
- интерпретатор языка «Ядро»;
- процессор подсистемы визуального программирования;
- программа формирования отчетов;
- справочная подсистема поддержки открытого кода;
- данные на языке «Ядро» для формирования конечно-элементной модели сетчатой анизотридной конструкции регулярной структуры.

Комплекс «Композит НК» предоставляет средства как для проведения типовых расчетов, не связанных с расширением или модификацией программного кода, так и для решения задач повышенной сложности, требующих изменения открытого кода: добавления визуальных панелей и (или) реализации функциональных объектов на языке C++.

Решение типовых задач, алгоритмы которых предусмотрены в составе комплекса «Композит НК», заключается в подготовке текста исходных данных на входном языке «Ядро», их трансляции в форму текстовых таблиц, проведении расчета и формировании отчетов, содержащих результаты, для последующей обработки отчетов стандартными средствами машинной научной графики.

## **2.4 Нахождение областей опасного напряжения в окрестностях горных выработок**

Для анализа углепородного массива, был использована методика расчета параметров нестационарного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя. В основу этой методики лежит расчет напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов [61,62].

Одной из составляющих метода конечных элементов является подготовительная процедура создания триангуляционной сети, которая

выполняется в полуавтоматическом режиме с помощью сеточного редактора[63]. В результате создается матричная модель жесткости элементов, которая входит в состав программного комплекса «Композит-НК» для расчета НДС состояния углепородного массива. В качестве исходных данных используются такие показатели как модуль упругости материала и коэффициент Пуассона. Принцип открытой архитектуры, реализуемый в информационной системе, позволяет заменить логику, описывающую поведение массива на другую, наиболее адекватную для конкретного углепородного массива. Для сообщения с другими частями программного комплекса «Композит-НК» использует набор структурированных файлов.

Решение типовых задач, алгоритмы которых предусмотрены в составе комплекса «Композит НК», заключается в подготовке текста исходных данных на входном языке «Ядро», их трансляции в форму текстовых таблиц, проведении расчета и формировании отчетов, содержащих результаты, для последующей обработки отчетов стандартными средствами машинной научной графики.

Исходные данные для проведения типового расчета представляют собой набор таблиц с числовыми данными, описывающими расчетную модель: её топологию, геометрию, внутреннюю структуру, характеристики материалов, кинематику и воздействия.

В настоящий момент данные о модели могут быть подготовлены только непосредственным созданием текстовых файлов и трансляцией данных, написанных на специализированном языке «Ядро». Этот способ не удобен в связи с трудоемкостью и неочевидностью представления данных. В связи с этим было принято решение о создании трехмерного графического редактора для генерации исходных файлов. Таблицы исходных данных о модели для комплекса «Композит НК» перечислены в таблице 4.

Для построения трехмерной модели было предложено использовать современные информационные технологии в области трехмерного моделирования.

## Исходные данные ПК "Композит НК"

№	Наименование	Имя файла
1.	Коды перемещений	param.txt
2.	Координаты узлов	coord.txt
3.	Коды закреплений	ng.txt
4.	Ориентация	orient.txt
5.	Узловые силы	q.txt
6.	Начальные перемещения	u.txt
7.	Типы элементов	typelt.txt
8.	Топология	top.txt
9.	Местные оси	cm.txt
10.	Сечения и армирование	SecantData.txt
11.	Эксцентриситеты	excentr.txt
12.	Распределенные нагрузки	QVolumeMCK.txt
13.	Характеристики материалов	matdata.txt

После проведения сравнительного анализа существующих визуализаторов [64] было принято решение использовать пакет Unity3D.

На основе программного пакета трехмерного моделирования была разработана система, позволяющая в трехмерном пространстве задать координаты узлов и установить соответствие между узлами и элементами (рис. 11). Для этого были разработаны манипуляторы – куб и сфера. Куб характеризует узел элемента. Соответственно, каждому узлу сопоставляется экземпляр класса, описывающий характеристики узла, которые должны находиться в файлах для построения исходной модели: значения степеней свободы (перемещений); закреплений; ориентация осей; значения сосредоточенных сил и моментов сил, приложенных к узлам; значения заданных перемещений узлов [91]. Сфера – это манипулятор, который описывает конечный элемент. С помощью элементов графического элемента можно задать узлы, принадлежащие этому элементу (топологию), указать направление локальных осей элемента, эксцентриситеты и данные о сечении.

В результате формируются 13 файлов, который можно использовать в качестве исходных данных для программного комплекса «Композит-НК».

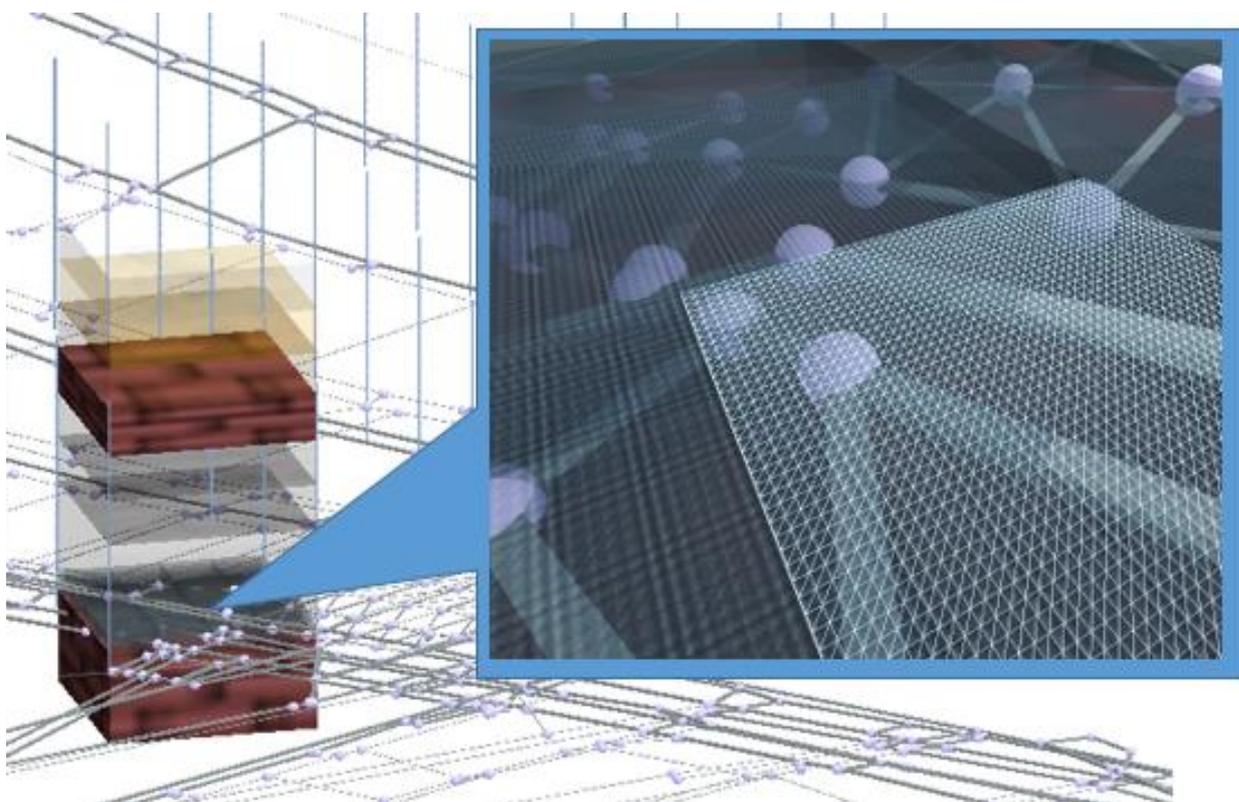


Рисунок 11 – Пример разбиения угольного пласта на конечные элементы

В результате работы программного комплекса «Композит-НК» формируются массивы данных, описывающие напряжения в конечных элементах породного массива кровли в очистной выработке. В основе расчетной части лежит метод конечных элементов [97].

Полученные в итоге сведения описывают значения показателей смещения и напряжения в горном континууме. Для анализа и визуализации исследуемой области горного массива, используются пояснения с интерпретацией полученных результатов. Например, в случае, если напряжение в породе превысило критическое значение – это говорит о появлении трещин в кровле пласта. Реализуемый в методе способ представления данных в виде трехмерного компьютерного изображения позволяет эффективно оценить условия безопасности ведения очистных работ.

В программе существует возможность изменения ракурса и свободного передвижения по сцене с построенной трехмерной моделью, что позволяет пользователю выяснить все необходимые сведения о любых участках углепородного массива, представленного в модели.

## **Выводы по главе**

Анализ существующих математических моделей в области горного дела показал, что для оценки безопасности ведения горных работ в аспекте напряженно-деформированного состояния углепородного массива применяется широкий спектр различных аналитических алгоритмов, выбор которых зависит от условий ведения работ на конкретном угольном предприятии.

Наиболее удобным для решения задачи расчета напряженно-деформированного состояния углепородного массива представляется метод конечных элементов, позволяющий подробно описать неоднородную структуру горного массива. В теоретическом плане горная геомеханика основывается на принципах механики деформируемого твердого тела, поэтому при решении задачи деформирования горных пород используются основные соотношения линейной теории упругости.

В связи с необходимостью в высокой степени гибкости математического аппарата, предложена архитектура горной географической информационной системы с открытыми интерфейсами для взаимодействия с математическим аппаратом. Для примера, в качестве каркаса для построения математических моделей выбран программный комплекс «Композит-НК», позволяющий собрать необходимую конфигурацию математического аппарата для анализа исследуемой модели.

Предлагаемое математическое обеспечение компьютерного моделирования процесса эвакуации позволяет осуществлять мониторинг напряженно деформированного состояния углепородного массива и оценивать уровень безопасности.

### **3 Разработка и адаптация алгоритма нахождения кратчайшего маршрута для геоинформационного моделирования маршрутов эвакуации**

#### **3.1 Описание предлагаемой методики построения модели эвакуации горнорабочих**

Сравнительный анализ информационных систем показал, что системы не приспособлены для оперативного нахождения маршрутов и корректировки маршрутов в условиях опасной геомеханической ситуации и не рассчитывают время выхода на поверхность [98]. В связи с этим, целесообразно создание собственного программного продукта для обеспечения вопросов минимизации последствий чрезвычайных происшествий, основанное на методике анализа геомеханического состояния горного массива с целью вывода людей на поверхность.

Для создания методики было проведено изучение существующих технологий и алгоритмов, используемых в современных информационных системах обеспечения безопасной работы на шахтах угольных предприятий. Результат сравнения выявил, что все системы используют анализ геомеханического состояния горного массива, получаемое на основании данных, полученных от специализированных датчиков, отвечающих за мониторинг каких-либо свойств: температура, давление, сейсмическое состояние, состав воздуха и т.д [90]. Поскольку процедура сбора данных решена изначально на каждом предприятии, основной вопрос стоит в решении задачи построения трехмерной модели, основанной на актуальных данных, получаемых от датчиков совместно с данными о геологической разведке. Это позволит не только построить модель подземной части горнодобывающего предприятия с высокой степенью адекватности, но и производить имитационное моделирование, изменяя желаемые характеристики для получения различных ситуаций, что в свою очередь позволит прогнозировать

изменения зон, опасных с точки зрения геомеханического состояния породы. Для представления результатов анализа с высокой степенью эргономичности когнитивного восприятия сведений, целесообразно применять средства построения трехмерных компьютерных изображений. Это упрощает навигацию и изменений свойств и у отдельных частей модели (горный массивы, выработки и т. д). Помимо этого, в рассмотренных системах применяют геоинформационные методы: устанавливается связь между атрибутивными данными и пространственными. Это необходимо для отслеживания опасных зон и координации персонала, находящегося внутри шахты. Однако для этих целей, как правило, используются модули GPS навигации, которые не учитывают угол падения и простирания пласта. Это приводит к возникновению искажения пространственных данных, что в свою очередь, отражается на расчетах времени выхода из шахты.

В связи с этим, для построения модели шахты необходимо проанализировать данные геологической разведки и построить на их основании модель углепородного массива. Затем на основании данных о горных выработках построить модель подземной части горного предприятия и совместить с моделью углепородного массива. После этого проанализировать состояние углепородного массива и построить путь выхода на поверхность, минуя опасные участки или изменять его в режиме реального времени, если на пути выхода возникли непреодолимые препятствия.

Основная идея методики представляется в виде алгоритма из нескольких последовательных шагов.

– Построение модели шахты.

На первом этапе осуществляется построение модели шахты, которая состоит из трех частей: построение углепородного массива, построение структуры подземной части горного предприятия. Этот этап состоит из трех последовательных частей.

- Наполнение базы данных.

Первым, подготовительным этапом построения модели является структуризация и систематизация данных. Поскольку заранее известно, что база данных будет совмещать себе большой объем как исходных, так и полученных в результате анализа данных, возникает необходимость в использовании специальных технологий хранения и обработки данных. Для наиболее эффективного построения в данном случае целесообразно использовать технологию «хранилища данных». Однако прежде чем организовывать массивы данных в хранилища необходимо определить вид модели данных, наибольший интерес из которых (для данного исследования) представляют следующие:

- пространственные – базы данных, в которой поддерживается возможность хранения пространственных атрибутов объектов;
- темпоральные или временные – базы данных, в которых поддерживается возможность хранения хронологической составляющей;
- накопительные – базы данных, в которых оговаривается механизм изменения данных, при котором предыдущие данные о состоянии модели не удаляются, а сохраняются с меткой версии.

Для проводимого исследования необходимо использовать метод хранения данных основанный на комбинированном подходе. Пространственные данные необходимо хранить в зашифрованном виде, так как сведения о расположении разведочных скважин на предприятии, а также расположение месторождения полезных ископаемых является государственной тайной. После проектирования базы данных, сведения о разведочных скважинах и горных выработках передаются в базу данных.

- Построение модели углепородного массива.

На основании сведения о разведочных геологических данных строится модель горного массива. Данные о разведочных скважинах интерполируются, что позволяет не усреднять значение ключевым физическим характеристикам, необходимым для исследования (коэффициент упругости, модуль Пуассона) для всего пласта, а оценить каждую область пласта по средним значениям,

полученных по результатам лабораторного исследования соседних разведочных скважин.

- Построение модели горных выработок.

После построения углепородного массива в базу данных передаются сведения каждой горной выработке: координаты узлов, периметр, сечение, размеры выработки и другие дополнительные сведения необходимые для построения маршрута.

- Визуализация модели.

Для удобства работы, построенная модель визуализируется в виде трехмерного компьютерного изображения. Это позволяет настраивать свойства каждого элемента модели, добиваясь приемлемого уровня адекватности.

Анализ напряженно-деформированного состояния.

На этом этапе осуществляются вычисления, необходимые для оценки безопасности маршрутов эвакуации.

- Расчет НДС в углепородного массива с помощью «Композит-НК».

Основа метода конечных элементов является подготовительная процедура создания сетки, которая выполняется в полуавтоматическом режиме с помощью сеточного редактора. В результате создается матричная модель, которая является основой для ПК «Композит». Данные о модели экспортируются в «Композит-НК», где рассчитываются значения смещения и напряжения для каждого конечного элемента.

- Анализ полученного НДС углепородного массива.

После того как получены значения НДС горного массива они снова экспортируются в базу данных. Это необходимо для выявления опасных зон. Опасность зоны определяется с помощью применения OLAP-технологии обработки данных за счет сравнения значения напряжения со справочным значением предельного напряжения для данной породы.

- Пространственный анализ данных.

Благодаря анализу трехмерной модели на этом этапе определяются выработки, передвижение по которым в случае эвакуации опасно или нежелательно.

#### Нахождение маршрута

- Построение дискретной модели горных выработок.

Трехмерная модель горных выработок преобразуется в неориентированный взвешенный граф. Поскольку конечная модель будет представляться в виде двухмерного графического изображения необходимо применение алгоритмов «разворачивания» графа для более удобной работы при минимизации потери информативности.

- Нахождение ветвей, попадающих в зону опасного НДС.

Сведения об уровне опасности горных выработок переносятся на двумерный граф. Эта подготовительная процедура необходима для построения оптимального маршрута.

- Нахождение оптимального маршрута.

Граф анализируется с помощью алгоритма Дейкстры, в результате чего находится оптимальный маршрут выхода на поверхность из забоя. Существует возможность указать несколько «начальных точек» для заблаговременного сохранения маршрутов на случай возникновения различных нештатных ситуаций.

#### Расчет времени выхода

Вычисляется необходимое время выхода на поверхность по рассчитанному маршруту. Оно соотносится с временем, которое могут обеспечить средства индивидуальной защиты.

- Настройка скоростных коэффициентов.

Взвешиваются все ветви графа, указываются значения скорости передвижения горнорабочих для каждой выработки.

- Устранение пространственного искажения.

В касках шахтеров находятся GPS датчики, однако при использовании стандартных датчиков GPS-навигации возникает пространственное

искажение, обусловленное углом падения угольного пласта. Предлагается два способа решения проблемы искажения: монокоординатный и поликоординатный.

- Вычисление времени эвакуации.

В зависимости от выбранной методики и выбранных настроечных коэффициентов вычисляется время выхода сотрудника на поверхность. В случае если время выхода по кратчайшему маршруту превышает времени расхода ресурса самоспасателя, предлагается установить дополнительные пункты ВГК на пути движения на поверхность.

- Моделирование движения сотрудников.

Этот этап необходим для моделирования возникновения нештатной ситуации в процессе движения сотрудников к выходу на поверхность для нахождения альтернативного маршрута.

- Анализ оставшегося времени выхода из шахты на основании реальной скорости движения

На основании условий окружения в горных выработках, создавшихся вследствие возникновения чрезвычайной ситуации, скорость передвижения сотрудников в шахте может не соответствовать значению, соответствующему движению по выработке. Этот параметр вычисляется персонально для каждого сотрудника, на основании чего вычисляется время его выхода на поверхность.

- Нахождение оптимальных маршрутов в случае блокировки пути

Если во время выхода из маршрута появилось препятствие (например, разрушения или блокировка в выработке), то путь пересчитывается с учетом обхода препятствия.

### **3.2 Способ устранения пространственного искажения**

При использовании стандартных датчиков GPS-навигации возникает пространственное искажение, обусловленное углом падения угольного пласта.

Частично эти проблем решаются существующими ГИС[55]. Для получения более полного решения предлагается несколько способов преодоления проблемы искажения. Первый способ - монокоординатный - заключается в преобразовании пространственных данных, путем перенесения проекции с плоскости параллельной поверхности земли на плоскость, параллельную простиранию горных выработок в пласте. Это позволит пользоваться одной и той же системой координат для обозначения пространства как внутри шахты, так и на поверхности Земли. Этот способ удобен с точки зрения использования одинаковых единиц измерения в рамках единого пространства, однако при необходимости нахождения расстояния (например, для вычисления времени выхода из шахты) перед основными вычислениями (расстояние между двумя точками) потребуется производить дополнительные вычисления для преобразования каждой точки, участвующей в маршруте. Стоит также отметить, что угол может быть трехмерным, т.е. дополнительно к углу падения может появиться необходимость в учете угла относительно простирания пласта, что также усложняет расчеты[81].

Второй способ - поликоординатный - заключается в построении новой оси координат в плоскости простирания пласта. В этом случае формируется “подземная карта” - новое пространство со своей точкой начала координат и единицами измерения. В этом случае для измерения расстояния внутри горных выработок не подразумевает дополнительных преобразований, что существенно увеличит скорость расчета. Недостатком данного способа является необходимость создания интерфейса между глобальными географическими координатами и координатами пространства шахты. Этот интерфейс представляет собой выражение вида  $S' = f(S)$ , где  $S$  - это географические координаты поверхности, а  $S'$  - координаты области на подземной карте. Функция  $f$  может находиться тремя способами:

Аппроксимирующий, аналитический - в случае если существует возможность сгладить плоскость пласта с помощью трёхмерной функции. В данном случае зависимость между операндами будет функциональной.

Адаптивный, интеллектуальный - в случае, если трехмерную функцию подобрать сложно, либо в принципе невозможно из-за сложной конфигурации пласта целесообразно применять технологию обучения на базе архитектуры искусственной нейронной сети. Через нейронную сеть пропускаются данные о конфигурации пласта и соответствующие координатам подземной каты - географические координаты. В результате получится выражение вида:

$$S(x, y, z)' = (w_1 \cdot S(x), w_2 \cdot S(y), w_3 \cdot S(z)), \quad (3.1)$$

где  $w_1, w_2, w_3$  - подстраиваемые, “адаптирующиеся” коэффициенты. В этом случае зависимость будет стохастической и иметь методическую погрешность[80].

Еще одна проблема, которая возникает в случае применение поликоординатного способа, заключается в неоднородном простирании пласта относительно поверхности. В очень редких случаях плоскость будет соответствовать всему простиранию пласта. Предлагается три варианта решения этой проблемы:

В случае если отклонение не велико - предлагается строить «медианное пространство» - усредняющую плоскость, аппроксимирующую расположение пласта в пространстве

В случае если отклонение некоторых участков таково, что медианное пространство не будет удовлетворять желаемой точности, предлагается строить локальные пространства - разбивать плоскость пласта на несколько участков с монотонным пространственным поведением.

Аналитическое построение криволинейного пространства. Построить математическую модель пласта и описать его части через математические функции. Это позволит повысить точность вычисления расстояния и времени доступа к определенной точке в шахте, однако в аспекте построения трехмерного компьютерного изображения для визуализации данное решение будет сводиться к первому или второму[96].

Каждый способ решения проблемы сопоставления географических координат с локальными координатами шахты имеет свои преимущества и недостатки. В случае, если не требуется вычислять расстояния внутри горных выработок, пласт имеет монотонную конфигурацию, существует необходимость в построении зон на географической карте, соответствующих подземным зонам - рекомендуется использовать монокоординатный способ. В случае, если необходимо постоянно вычислять расстояния или объемы подземного пространства, конфигурация пласта сложна, а возникающая при расчетах погрешность приемлема - рекомендуется использовать второй способ. В общем случае рекомендуется использовать комбинированный метод - это позволит решать обширную область задач анализа пространства с необходимым уровнем качества.

### **3.3 Алгоритм нахождения маршрута эвакуации**

Существующие алгоритмы позволяют определить маршруты выхода на поверхность на этапе проектирования горнотехнических систем, однако не позволяют в оперативном режиме корректировать маршрут в случае возникновения нештатной ситуации, не учтенной в плане ликвидации аварий. Большинство применяемых алгоритмов не учитывают при расчете индивидуальных особенностей горнорабочих для оценки времени прохождения по найденному маршруту.

В связи с этим предложена адаптация алгоритма (рис. 12) расчета длины маршрута и времени эвакуации по данным средств позиционирования шахтёра с учетом характеристик выработок, состояния эвакуируемого человека и ресурса индивидуальных средств защиты.

Весы графа вычисляются на основе пяти показателей: длина выработки, скорость движения воздуха, показатель концентрации метана, показатель концентрации вредных газов и показатель температуры воздуха.

В качестве веса выработки используется нормализованная для, вычисляемая как отношение значения текущего расстояния выработки к максимальной длине выработки:

$$w_{p_i}(s_i) = \frac{s_i}{\max_{k=1..n}(s_k)}. \quad (3.2)$$

Вес, описывающий скорость движения воздуха вычисляется на основе приказа федеральная службы по экологическому, технологическому и атомному надзору приказ от 11 декабря 2013 г. N 599 об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых.

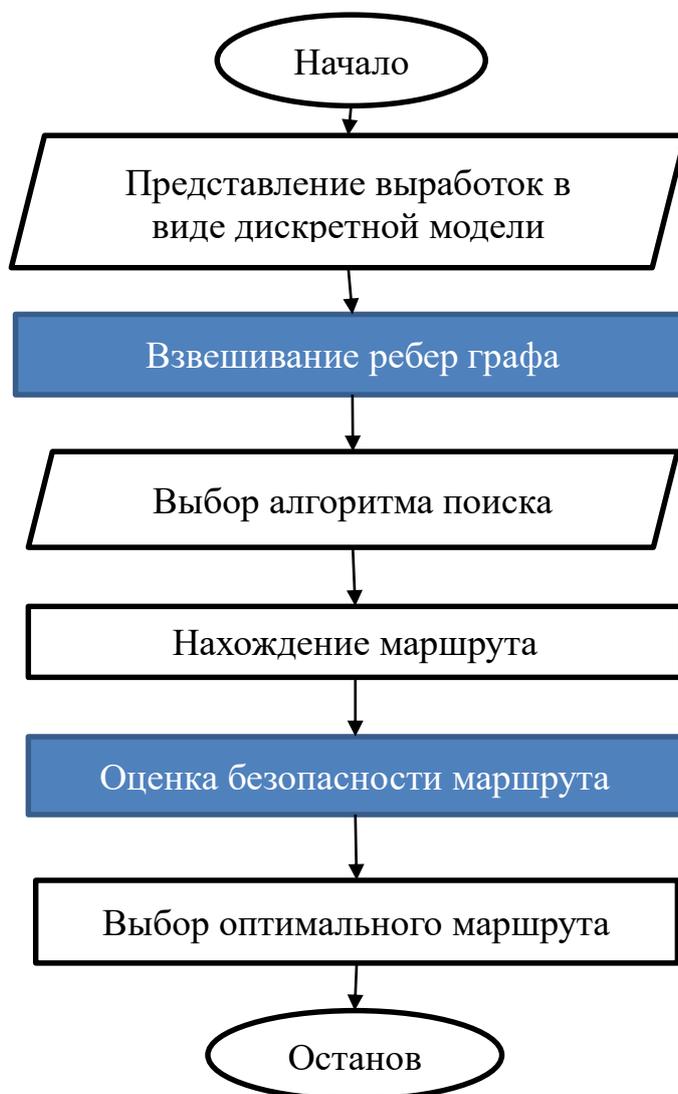


Рисунок 12- Алгоритм определения оптимального пути эвакуации

Минимальная скорость воздуха (м/с) в горных выработках определяется по формуле [15]:

$$V_{i\min} = \frac{0.1 \cdot P_i}{S_{\text{сеч}_i}} \quad (3.3)$$

, где  $S_{\text{сеч}_i}$  - площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>,

$P_i$  - периметр выработки, м.

Максимальная скорость не должна превышать следующих норм:

- в очистных и подготовительных выработках -  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- в квершлагах, вентиляционных и главных откаточных штреках, капитальных уклонах -  $8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- в остальных выработках -  $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- в воздушных мостах (кроссингах) и главных вентиляционных штреках -  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- в стволах, по которым производятся спуск и подъем людей и грузов, -  $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

После нахождения минимального и максимального значения скорости движения воздуха для каждой выработки чего составляется функция принадлежности для каждой выработки:

$$w_{c_i}(V_i) = \begin{cases} \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}, & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ 1, & V_i > V_{\max} \\ 0, & V_i < V_{\min} \end{cases} \quad (3.4).$$

Расчеты весов, характеризующих концентрацию метана и вредных газов основаны на приказе Ростехнадзора от 01.12.2011 N 678 (ред. от 02.04.2015) "Об утверждении Положения об аэрогазовом контроле в угольных шахтах" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2011 N 22812). В этом нормативном документе описаны пороговые значения, которые являются основой для составления функций принадлежности. Соответственно, вес, описывающий концентрацию вредных газов (КВМ) в воздухе рассчитывается как:

$$w_{\text{ВГ}_i}(\text{КВГ}_i) = \begin{cases} \frac{\text{КВГ}_i - \text{КВГ}_{\min}}{\text{КВГ}_{\max} - \text{КВГ}_{\min}}, & \text{КВГ}_{\min} \leq \text{КВГ}_i \leq \text{КВГ}_{\max} \\ 1, & \text{КВГ}_i > \text{КВГ}_{\max} \\ 0, & \text{КВГ}_i < \text{КВГ}_{\min} \end{cases} \quad (3.5),$$

вес, описывающий концентрацию метана (КМ) в воздухе:

$$w_{\text{М}_i}(\text{КМ}_i) = \begin{cases} \frac{\text{КМ}_i - \text{КМ}_{\min}}{\text{КМ}_{\max} - \text{КМ}_{\min}}, & \text{КМ}_{\min} \leq \text{КМ}_i \leq \text{КМ}_{\max} \\ 1, & \text{КМ}_i > \text{КМ}_{\max} \\ 0, & \text{КМ}_i < \text{КМ}_{\min} \end{cases} \quad (3.6).$$

Согласно санитарным требованиям, правилам безопасности в угольных шахтах, единым правилам безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом устанавливается максимальная температура воздуха +26 °С при относительной влажности его до 90% и +25 °С при относительной влажности его более 90% [14]. Допустимые значения температуры воздуха в горных выработках показаны в табл. 5.

С учетом этой таблицы вес, описывающий климатические условия на основании данных о температуре, влажности и текущей скорости движения воздуха рассчитывается следующим образом

$$w_{\text{T}_i}(\text{T}_i) = \begin{cases} \frac{\text{T}_i - \text{T}_{\min}}{\text{T}_{\max} - \text{T}_{\min}}, & \text{T}_{\min} \leq \text{T}_i \leq \text{T}_{\max} \\ 1, & \text{T}_i > \text{T}_{\max} \\ 0, & \text{T}_i < \text{T}_{\min} \end{cases} \quad (3.7)$$

Общий вес выработки вычисляется как максимальное значение рассчитанных весов:

$$w_i = \max(w_{\text{P}_i}, w_{\text{C}_i}, w_{\text{T}_i}, w_{\text{ВГ}_i}, w_{\text{М}_i}). \quad (3.8)$$

Таблица 5

Допустимые значения температуры воздуха в горных выработках

Скорость движения воздуха, м/с	Допустимая температура, °С, при относительной влажности, %		
	60-75	76-90	свыше 90
0,25	16-24	18-23	18-22
0,5	18-25	19-24	19-23
1	19-26	20-25	20-24
2 и более	20-26	22-26	22-26

Вычисленное значение веса выработки используется поисковыми алгоритмами для нахождения безопасного пути. После этого необходимо оценить оптимальность найденного пути с помощью коэффициента уровня риска.

### 3.4 Вычисление уровня риска передвижения по маршруту эвакуации

Для оценки уровня риска передвижения по маршруту ( $k_6$ ) применяется способ расчета, основанный на вычислении отношения времени, необходимого горнорабочему для передвижения по маршруту ( $t_э$ ) и времени, на которое рассчитаны индивидуальные средства защиты ( $t_{сз}$ )

$$k_6 = \frac{t_э}{t_{сз}}. \quad (3.9)$$

Время, необходимое горнорабочему для выхода на поверхность по  $n$  выработкам в маршруте рассчитывается по формуле:

$$t_э = \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_i \cdot w_i}{v_ч} \right), \quad (3.10)$$

где  $s_i$  – расстояние каждой выработки в маршруте,

$v_ч$  – скорость передвижения человека,

$w_i$  – вес выработки.

Максимально возможное время работы самоспасателя, зависит от скорости вентиляции легких. Сначала рассчитывается (ДО):

$$ДО = (h - 110) \cdot 8, \quad (3.11)$$

где  $h$  – рост горнорабочего, см.

На основе этого значения вычисляется минутный объем вентиляции легких (МОД):

$$МОД = ДО \cdot ЧД, \quad (3.12)$$

где  $ЧД$  - количество дыханий в минуту в состоянии физиологического покоя.

$$t_{c3}(\text{МОД}) = \begin{cases} t_{\text{п}}, \text{МОД} \leq \text{МОД}_{\text{п}} \\ t_{\text{п}} - (t_{\text{п}} - t_{\text{с}}) \cdot \left(\frac{\text{МОД} - \text{МОД}_{\text{п}}}{\text{МОД}_{\text{с}} - \text{МОД}_{\text{п}}}\right), \text{МОД}_{\text{п}} < \text{МОД} < \text{МОД}_{\text{с}} \\ t_{\text{с}}, \text{МОД} = \text{МОД}_{\text{с}} \\ t_{\text{с}} - (t_{\text{с}} - t_{\text{т}}) \cdot \left(\frac{\text{МОД} - \text{МОД}_{\text{с}}}{\text{МОД}_{\text{т}} - \text{МОД}_{\text{с}}}\right), \text{МОД}_{\text{с}} < \text{МОД} < \text{МОД}_{\text{т}} \\ t_{\text{т}}, \text{МОД} \geq \text{МОД}_{\text{т}} \end{cases} \quad (3.13)$$

где  $\text{МОД}_{\text{п}}$  – лёгочная вентиляция в состоянии покоя

$t_{\text{п}}$  – время работы самоспасателя, рассчитанное на  $\text{МОД}_{\text{п}}$

$\text{МОД}_{\text{с}}$  – лёгочная вентиляция во время нагрузок средней тяжести

$t_{\text{с}}$  – время работы самоспасателя, рассчитанное на  $\text{МОД}_{\text{с}}$

$\text{МОД}_{\text{т}}$  – лёгочная вентиляция во время тяжелых нагрузок

$t_{\text{т}}$  – время работы самоспасателя, рассчитанное на  $\text{МОД}_{\text{т}}$

Эти величины зависят от модели самоспасателя. В случае, если на шахте используется несколько типов, необходимо закреплять за каждым сотрудником определенную модель.

Получаемый в результате коэффициент спасения интерпретируется следующим образом: если значение коэффициента превышает единицу, это говорит о том, что у сотрудника есть запас времени. Если, же коэффициент меньше единицы, то это говорит о нехватке времени на поверхность. В этом случае, программа пытается найти маршрут, включающий в себя прохождение через Камеры Аварийного Воздухоснабжения (КАВС) – для получения дополнительного ресурса самоспасателя, либо пережидании аварии. Соответственно, оптимальным будет являться маршрут с минимальным значением коэффициента безопасности.

После обновления топологии графа, значения весов для ранее проанализированных ветвей не пересчитываются. Сведения о ранее рассчитанных маршрутах также сохраняются во временное хранилище данных и используются при последующих расчетах. Такая реализация численного метода позволяет уменьшить время определения маршрута после обновления модели на 76% по сравнению с первичным расчетом. Уменьшение количества ребер в графе после нахождения областей опасного напряжения и

после этапа вычисления весов позволили сократить размер графа при первичном расчете на 12%. С учетом автоматизированного характера составления ПЛА, предполагающего необходимость участия человека, общее время на разработку одной позиции в части составления маршрутов эвакуации сокращается на 20-25%. Таким образом, обосновано следующее научное положение: маршрут эвакуации персонала, наиболее рациональный по безопасности, определяется в результате логических и расчетных операций с геоданными, проводимых по созданному алгоритму, учитывающему оценку расхода ресурса самоспасателя и уровень риска передвижения по горным выработкам, отличающегося учетом сведений о концентрации метана и вредных газов в горных выработках, а также скорости, направления движения, температуры и влажности воздуха.

### **Выводы по главе**

Предложен алгоритм решения задачи нахождения оптимального маршрута выхода на поверхность для эвакуации горнорабочих.

Выбранные для решения поисковые алгоритмы были адаптированы для условий горного предприятия за счет вычисления весов каждой выработки маршрута в условиях существующих нормативных документов.

Разработан алгоритм вычисления времени для выхода на поверхность с учетом искажения пространственных данных, возникающих при наличии угла наклона и кривизны подземных выработок

Предложен численный метод решения задачи поиска оптимального маршрута выхода на поверхность посредством вычисления коэффициента безопасности, учитывающего индивидуальные физические данные горнорабочих и значение ресурса средств индивидуальной защиты. Предложены рекомендации по повышению уровня безопасности ведения очистных работ в случае недопустимого значения коэффициента безопасности для кратчайших маршрутов.

## **4 Реализация геоинформационного моделирования маршрутов эвакуации в виде комплекса компьютерных программ**

### **4.1 Способ хранения и анализа пространственно-атрибутивных данных**

Компьютерное моделирование геомеханических ситуаций с учетом положения секции механизированной крепи по длине выемочного столба, возможно на основе исследования и прогнозирования динамических процессов разрушения горных пород в окрестности очистного забоя. В связи с этим, возникает необходимость в мониторинге и управлении технологическими процессами, которые порождают большие массивы данных, объем которых обусловлен несколькими составляющими[71].

Во-первых, необходимо учитывать как можно больше факторов (согласно оценке влияния каждого из них) для построения адекватной модели. Зачастую это увеличивает атрибутивную составляющую информационной модели, поскольку необходимые характеристики относятся к разным сферам работы угольного предприятия: проблемам безопасности, экономической эффективности, геологической специфики и т.д. Разнородность в структурах данных, единицах измерения и сложная соотносимость данных порождает необходимость в разработке дополнительных способов хранения и обработки данных[72].

Во-вторых, при ведении работ на шахтах угольных предприятий географическая протяженность может измеряться сотнями и даже тысячами километров, причем как в ширину, так и в глубину. Это увеличивает пространственную составляющую информационной модели. Более того, сведения о пространстве могут быть представлены в различном виде: относительные координаты и географические координаты или параметрические значения глубин и высотных отметок, из которых вычисляются пространственные характеристики[73]. От способа хранения

пространственных данных зависит методика построения геометрической модели горного массива или горных выработок угледобывающего предприятия.

В-третьих, для динамического моделирования процессов выемки угля необходимо сохранять несколько статических состояний модели, снабжая каждую часть информационной модели темпоральным атрибутом. Только на основе построенного в результате моделирования хронологического ряда представляется возможным осуществлять прогноз состояния модели. Таким образом, и без того объемный массив данных увеличивается пропорционально количеству зафиксированных статических состояний модели.

На основе вышесказанного можно построить математическую модель, описывающую в общем случае пространство данных угледобывающего предприятия  $U$ :

$$U = \{X, Y, Z, L, t\}dt \quad (4.1)$$

где  $\{X, Y, Z\}$  – множество координат трехмерного пространства;

$L$  – атрибутивная составляющая, буквально описывающая множество сведений об изучаемой предметной области;

$t$  – хронологическая составляющая, описывающая пространство времени, которое лежит в основе мониторинга и прогнозирования данных.

Каждая компонента пространства описана непрерывной величиной. Совокупное количество элементов этого пространства зависит от диапазона изменения по каждой из компонент системы: изменяется размер изучаемого пространства, время наблюдения, а с приращением времени изменяются атрибутивные характеристики. Соответственно, меняется и объем данных, необходимый для обработки. Для того чтобы зафиксировать это пространство целесообразно провести квантование – разбить «поверхность» этого пространства на дискреты, более удобные для анализа и экстраполяции. Однако даже после дискретизации объем данных для обработки все еще остается довольно внушительным, что говорит о необходимости решения задачи управления большими объемами разнородных данных. Для решения

этой задачи предлагается способ манипулирования данными, посредством информационной модели системы, состоящий из трех частей: систематизации, анализа и хранения. Структура информационной модели данных для реализации предлагаемого способа представлена на рис. 13.

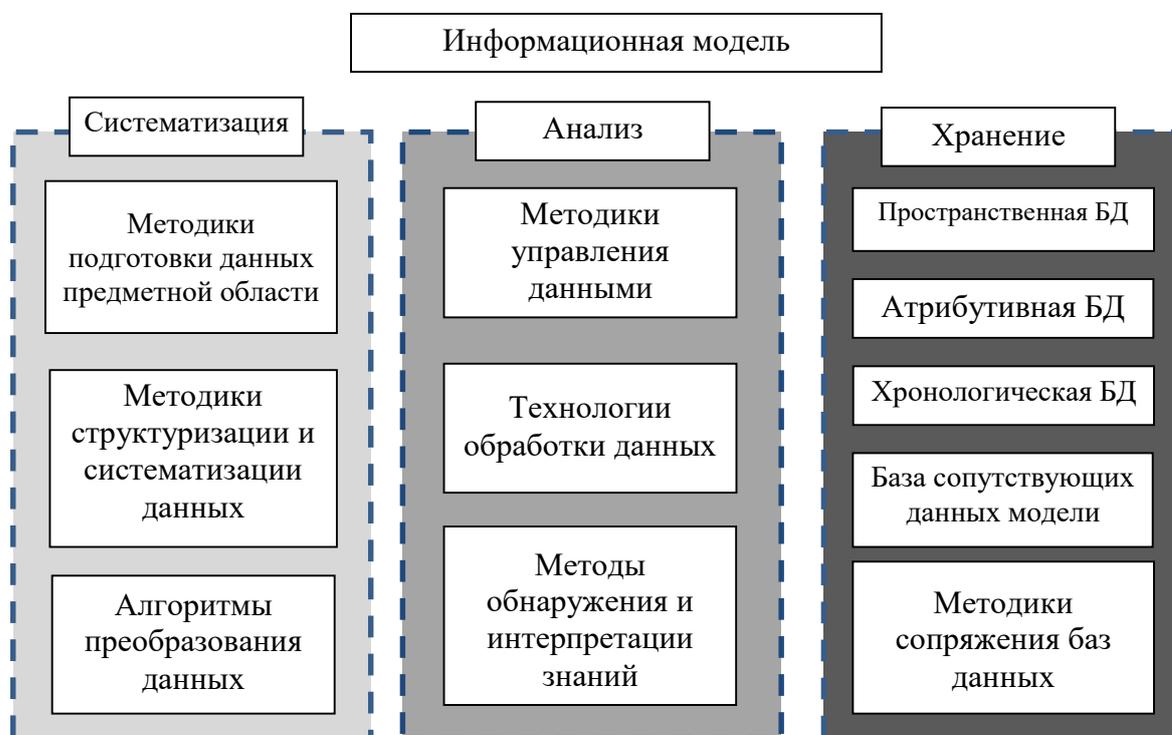


Рисунок 13 – Структура информационной модели данных для системы угледобывающего предприятия

### **Систематизация сведений предметной области**

Перед началом работы каждой информационной системы задействуются механизмы систематизации данных – подготовки сведений для использования внутри программных модулей. Задача заключается в систематизации массива данных. Полученная в результате систематизации структура данных должна обладать достаточным уровнем абстрактности и гибкости, но при этом конкретно описывать модель внутри предметной области. В данном случае, речь идет о структурировании геологических данных, полученных на основе анализа образцов горных пород. Каждая скважина обладает рядом характеристик: географические координаты, высотная отметка устья, глубина

скважины. Фиксируются данные о глубине залегания и мощности каждого пласта. Существуют различные способы структурирования этих сведений. Например, можно сохранять высотную отметку кровли и почвы каждого пласта. Либо, глубинную отметку начала залегания каждого пласта и мощность. Однако поскольку в будущем необходимо осуществлять трехмерную интерполяцию данных для получения из дискретных данных (скважин) непрерывной модели углепородного массива было принято решения хранить данные следующим образом: сохраняется высотная координата середины каждого пласта в керне и мощность пласта. Дополнительно реализовать в модели данных вычисляемые свойства, с помощью которых из мощности пласта и координаты середины рассчитывается координаты границ каждого пласта в скважине. Поскольку для разработки приложения был выбран язык программирования C# (среда разработки Mono Develop), предлагается использовать в качестве базовой структуры данных List(T) из пространства имен System.Collections.Generic. Преимущества этой структуры заключаются в скорости поиска и сортировки (по сравнению ArrayList), динамический размер (по сравнению с обычными массивами) и большая гибкость по сравнению с хеш-таблицей [70]. Элементом этого списка будет являться ссылочный тип – экземпляр класса «Разведочная скважина» с полями «Номер», «X», «Y», «Z устья», «Глубина» и еще одним вложенным списком List(T) «Слой керна». В свою очередь, элементами этого вложенного списка являются экземпляры класса «Элемент керна» с полями «Z центра», «Мощность», «Тип породы», «Состояние во времени» и двумя вычисляемыми свойствами – «Z почвы» и «Z кровли». Описанный способ хранения данных достаточно абстрактен и масштабируем, что позволяет расширить существующую структуру новыми атрибутами при необходимости, но при этом адекватно описывает практическую сторону предметной области. Например, добавляя атрибуты к классу «Тип породы», которые описывают геомеханическое поведение горной породы можно оценить напряженное состояние в нетронутом угольном массиве. Это не

нарушит общую структуру хранения данных, однако расширит описание модели. Во время проведения трехмерной интерполяции заполняются «ниши» между разведочными скважинами, образуются элементы с такой же структурой, но описывающие интерполированные данные. Суммарно разведочные и интерполированные скважины образуют модель углепородного массива шахтного поля. После этого возникает задача обработки и анализа полученного массива данных.

### **Технология анализа и обработки данных**

Анализ данных всегда проводится с целью извлечения полезной информации и принятия решений. В связи с этим, прежде чем выбирать способ обработки необходимо определить конечную цель анализа. В данном случае в качестве цели можно выбрать проектирование горных выработок и оценку напряженного состояния в нетронутом массиве. Сложность проектирования горных выработок заключается в их пространственном расположении – очистные выработки должны находиться параллельно пласту. В случае горизонтальных выработок необходимо учитывать наличие углов по падению и по простиранию пласта для облегчения транспортировки и обеспечения стока воды к водосборнику, соответственно необходим способ для оценки пространственного позиционирования выработки.

Изучение напряженно-деформированного состояния углепородного массива необходимо для оценки безопасности ведения горных работ. Однако помимо уровня напряжения горных пород, существуют и другие факторы, влияющие на безопасность: физические (температура, влажность, уровень шума и вибрации), химические (раздражающие, сенсibiliзирующие, канцерогенные), биологические (микро и микроорганизмы) и психологические. Адекватно оценить психологические и биологические факторы безопасности довольно сложно, а зачастую и вовсе невозможно. В свою очередь, физические и химические свойства вполне поддаются оценке с помощью специализированного аппаратного обеспечения. Однако после

сбора всего массива данных со всех исследуемых участков очень трудно проанализировать полученные сведения в совокупности. Для этого необходимо использовать специальные методы обработки: OLAP и Data Mining.

Технология OLAP позволяет соотнести разнородные данные, предоставив пользователю полную картину безопасности на выбранном участке. Одной из проблем, возникающих при сравнении и отображении показателей различных факторов заключается в несоотнесимых единицах измерения. Для решения этой проблемы предлагается на уровне СУБД организовать механизмы перехода от абсолютных шкал к относительным. Это позволит не только оценить степень опасности каждого выемочного участка, но и выявить причины возникновения чрезвычайных ситуаций. Механизм анализа Data Mining позволяет провести кластеризацию, выделяя группы факторов, совместно влияющих на общий уровень безопасности в исследуемом секторе, а также изучить динамику изменения состояния этого сектора и составить предположительный прогноз.

Зачастую в качестве результата работы OLAP понимается только таблично-текстовая форма представления [74]. Однако визуализировать результаты OLAP возможно с помощью технологий построения анаморфозного изображения [65]. Пример такой визуализации представлен на рис. 14. На данном изображении дискреты представляют собой прямоугольные «плиты», а значение их атрибутивной характеристики представлено геометрической высотой. Каждый атрибут обозначен отдельным цветом – синим, красным или желтым. Дополнительно была проведена процедура кластеризации, с помощью которой были сформированы непрерывные зоны «доминирования» атрибута в определенном пространственном секторе.

Большой объем с предъявляет повышенные требования к носителям информации: объему и скорости работы жесткого диска. В связи с этим, целесообразно использование клиент-серверной архитектуры.[75].

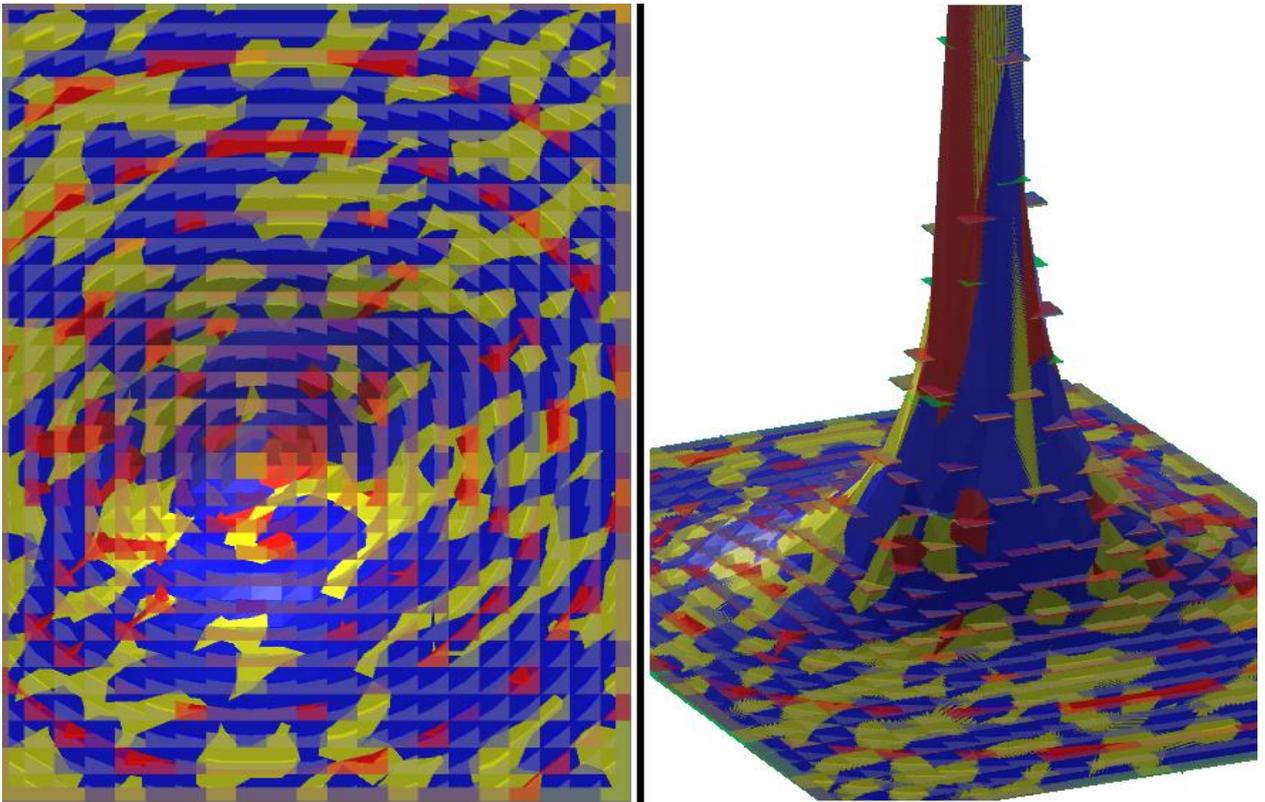


Рисунок 14 - Визуализация OLAP в виде анаморфозного изображения.

### **Хранение данных посредством хранилищ и витрин данных**

На клиентской машине необходимо использование базы данных, в которой будут содержаться сведения для оперативной обработки – построения общей модели углепородного массива (рис.15). В качестве серверной СУБД было принято использовать PostgreSQL[84]. Серверная СУБД позволяет разграничить уровни доступа пользователей с помощью ролей. Еще одним плюсом Postgre является наличие расширения PostGIS, которое позволяет реализовать пространственную составляющую базы данных [76]. Стоит также отметить, что база данных должна быть темпоральной (хранить хронологический атрибут) и реализовывать накопительный принцип.

На клиенте этого не требуется, следовательно, необходима база данных без серверной части, однако с более гибким программным интерфейсом для подключения и работы на разных операционных системах. Из существующих компактных встраиваемых реляционных баз данных больше всего в эту концепцию укладывается SQLite.



Рисунок 15 – Способ распределенного хранения данных

Поскольку передаваемые данные могут представлять собой коммерческую или государственную тайну на сервере и клиенте необходимы механизмы криптографической обработки данных.

В предложенном способе систематизации, хранения, анализа и преобразования пространственно-атрибутивных данных угледобывающего предприятия отображаемые данные по ходу работы детализируются и обобщаются в зависимости от действий пользователя. Все расчеты и анализ данных производится на сервере, а результаты обработки отправляются на клиентское приложение, задачей которого остается только преобразование полученных данных и отображение с помощью таблиц, диаграмм, изолиний на географической карте или средств трехмерной компьютерной визуализации.

Таким образом, задача систематизации данных была решена с помощью использования ссылочных структур данных, для хранения пространственно-атрибутивных данных угледобывающего предприятия было принято решение

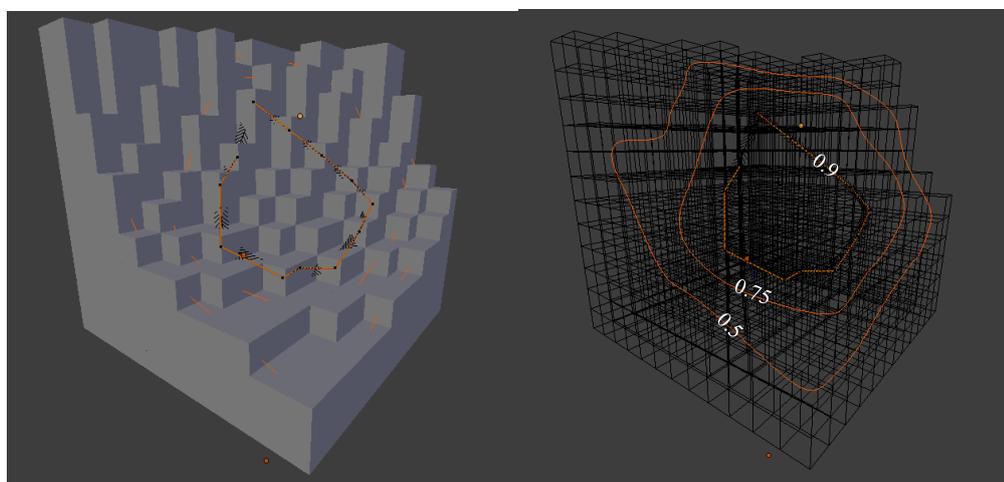
использовать распределенное хранилище данных, а для анализа и преобразования данных использовать технологии OLAP и DataMining. Это поможет увеличить продуктивность работы программ, разгрузив клиентские машины от избыточного объема данных и вычислительных операций [77].

## **4.2 Технология построения изоповерхностей для визуализации зон опасного напряжения**

### **Построение изоповерхностей**

Двумерные изолинии, полученные в специализированных пакетах (например, Surfer) не дают полной картины, так как отображают только одно боковое сечение. Трехмерные анаморфозы полученные в после обработки результатов расчета НДС не дают наглядного изображения[65]. В связи с этим было принято решение разработать способ создания трёхмерных изолиний и изоповерхностей с применением ГИС-технологий.

На первом этапе необходимо построить трехмерную изолинию согласно в углепородном массиве согласно результатам анализа НДС. Изолиния строится с помощью линии Безье, которая соединяет центры элементов (вокселей в виде куба) с одинаковым значением напряжения в дискрете. Напряжение внутри дискреты считается одинаковым. Результат построения трех изолиний показан на рис. 16.



**Рисунок 16 - Построение изолиний на трехмерной модели углепородного массива**

Трехмерная модель изолинии дает возможность построения изоповерхности – это некая поверхность, давление на границе которой будет всегда одинаковым. Поскольку изолиний несколько эта поверхность будет иметь «луковичную» или «слоистую» структуру.

Чем ближе к «ядру» модели, тем больше давление. Соответственно на внешних слоях давление будет практически отсутствовать [46]. Для построения поверхности был разработан метод трех видов (рис.17). Три полученные вида складываются в трехмерное изображение. Поверхность создается путем ортогонального переноса изолиний до пересечения в середине моделируемого куба. Полученную изоповерхность можно интерпретировать как объемную анаморфозу, описывающую напряженно-деформированное состояние углепородного массива [66].

Однако эти значения напряжения не привязаны к пространственным характеристикам, что затрудняет исследование места возможного обрушения. Для решения этой проблемы было предложено использование глубинных сечений – на заданной глубине углепородного массива срезается сечение найденных изоповерхностей (рис. 18).

В результате сечения на карте появляются плоские изолинии, означающие ореолы опасности обрушения породы. Это позволит создать атрибутивно-географическую, которая не только наглядно показывает степень опасности на указанной глубине шахты, но и укажет географические координаты аварийного состояния [67].

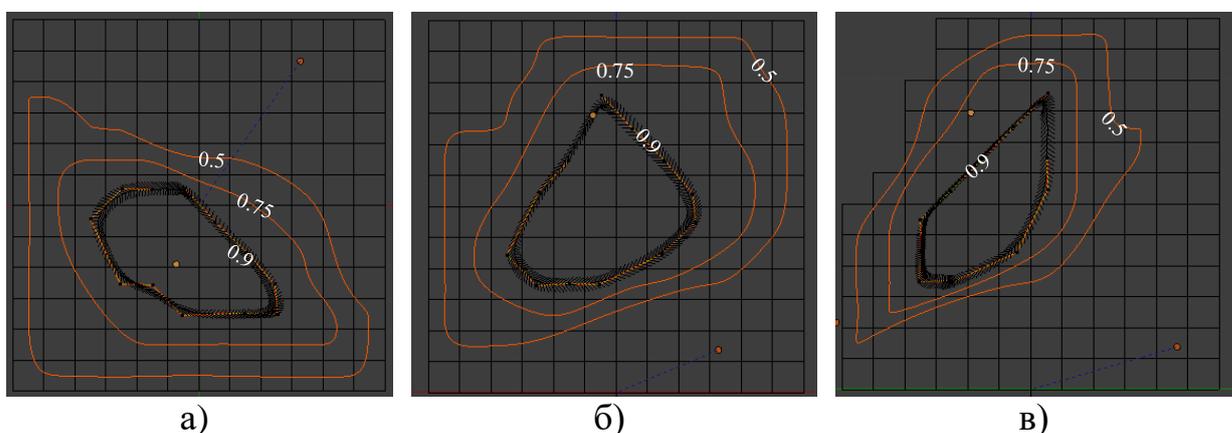


Рисунок 17 - Три вида модели: а – вид сверху, б – вид спереди, в – вид сзади.

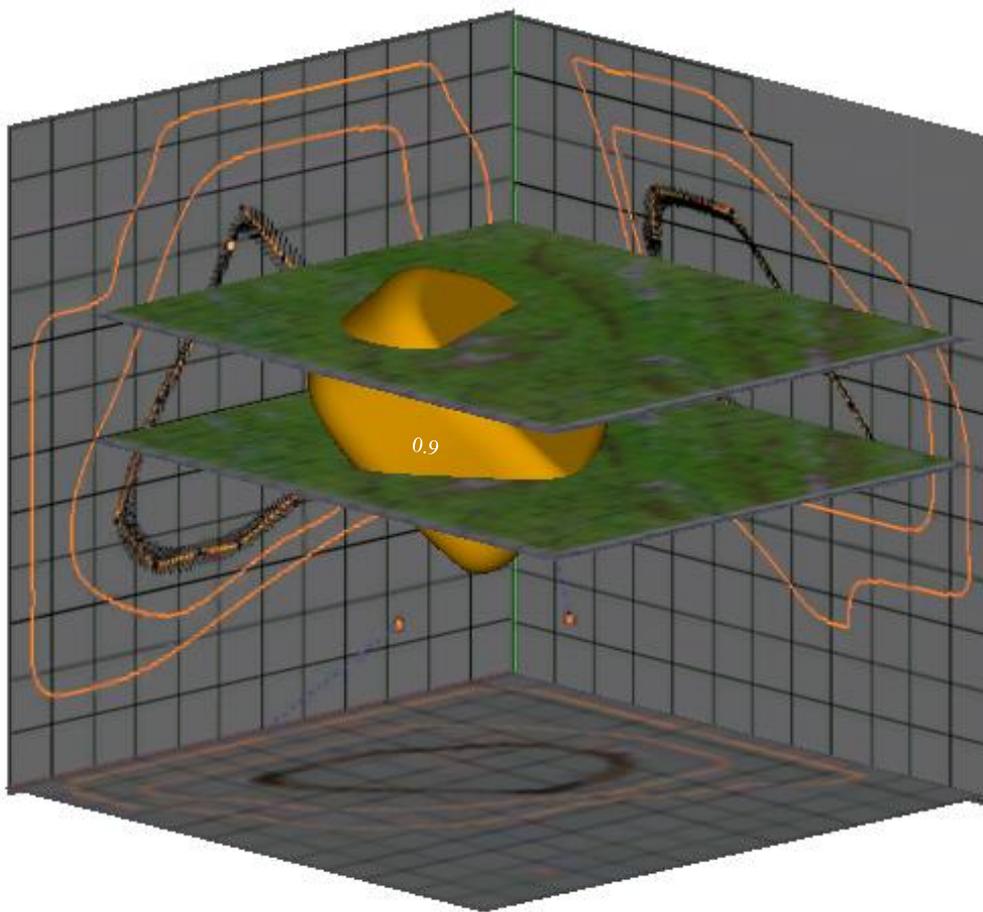


Рисунок 18 - Получения сечений изоповерхности

### **Визуализация зон опасного напряжения**

Выбор способа визуализации обуславливается математическим представлением абстрактной модели, которую можно описать в дискретной или непрерывной геометрической форме. Стоит отметить, что выбор способа геометрического моделирования не зависит от вида исходных данных. В случае с решаемой задачей, исходными данными являются дискреты, представляющие собой атрибутивно-пространственные вектора, которые можно описать следующей математической моделью:

$$\langle X, Z, A \rangle, \quad (4.2)$$

где  $X$  – пространственный атрибут, описывающая географическую широту;

$Z$  - пространственный атрибут, описывающая географическую долготу

$A$  – смысловой атрибут, описывающий значение характеристики в координате ( $X, Z$ ).

После сбора необходимых данных, массив векторов размещается в CSV-файле. Выбор CSV файла обусловлен несколькими причинами:

- формат прост в структурировании и не требует разработки специальной объектной модели; портативность – возможность подготовить файлы независимо от системы, для которой предназначены файлы CSV;

- кроссплатформенность – создание CSV файлов не предъявляет требований о специфической операционной системе

- программно-аппаратная независимость – не требует специализированного серверного программного и аппаратного обеспечения для работы.

Данные считываются из файла с помощью стандартных методов класса File из пространства имен System.IO. Полученный массив данных разбивается на строки по спецсимволу “\n”, а строки уже разбиваются на элементы по спецсимволу “;”. Полученные элементы структурируются в generic-контейнеры List<T>. Смысловые атрибуты хранятся отдельно от пространственных – это предоставляет возможность использовать один объем памяти, отведенный под координаты и комбинировать его с атрибутивными характеристиками. Однако прежде чем разделять данные на пространственные и атрибутивные характеристики, массив данных последовательно сортируется по двум критериям –  $X$  и  $Z$ .

После того как готовы контейнеры с атрибутивными и пространственными данными осуществляется построение трехмерной модели. Моделирование может проходить двумя способами.

В случае дискретного геометрического моделирования заготавливается «префаб» - шаблон для визуализации дискретности: настраиваются габариты и геометрия. Высота расположения этой дискретности в пространстве описывает значение атрибутивной характеристики [78].

В случае построения непрерывной геометрической модели необходимо рассчитать полигоны – элементарные многоугольники, из которых будет состоять непрерывная поверхность, описывающая распределение атрибута по поверхности. Трехмерная модель состоит из двух частей – вершин и треугольников, которые в свою очередь, складываются в меш – сеточную структуру для визуализации полигональных моделей. Необходимо корректно поместить массив точек в треугольники – они должны быть перечислены по часовой стрелке относительно вектора, определяющего направление «вверх» ортогонально плоскости треугольника [89]. Эта процедура осуществляется для каждого полигона. Вершины соединяются между собой посредством линейной интерполяции (рис. 19). После того как вычислены все многоугольники они помещаются в родительский контейнер для объектов, который фактически, представляет собой поверхность для визуализации распределения характеристики. Указывается шейдер и задается код цвета в пространстве RGB.

После того как построена трехмерная геометрическая модель начинается процесс визуализации. Поскольку описано два варианта построения модели, способов визуализации тоже два.

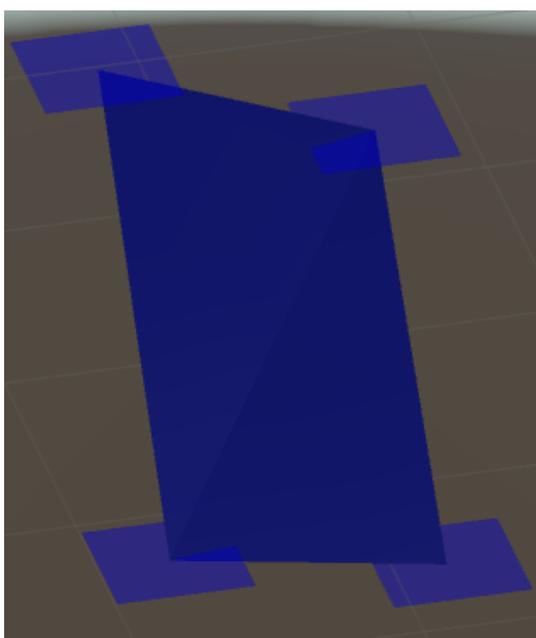


Рисунок 19 - Линейная интерполяция дискреты

Однако в обоих случаях добавляется подложка – растровое изображение карты в высоком разрешении.

Для визуализации дискретной модели на сцене инстанцируются префабы. Широта и долгота соответствует пространственной характеристике, а высота расположения объекта соответствует нормализованному значению атрибута. У каждого префаба дополнительно настраивается канал прозрачности – это необходимо для того, чтобы возможно было видеть карту. Пример визуализации дискретной модели представлен на рис. 20.

Для визуализации непрерывной модели строится комбинированный меш из полигонов, принадлежащих одному параметру. Каждый меш окрашивается в свой цвет для идентификации типа параметра.

В этом случае, прозрачность настраивается для географической карты. Результат визуализации непрерывной модели представлен на рис. 21. Еще одним важным условием интерполяции является использование камеры с ортогональной системой координат, в то время как в случае с дискретной моделью можно использовать перспективное искажение.

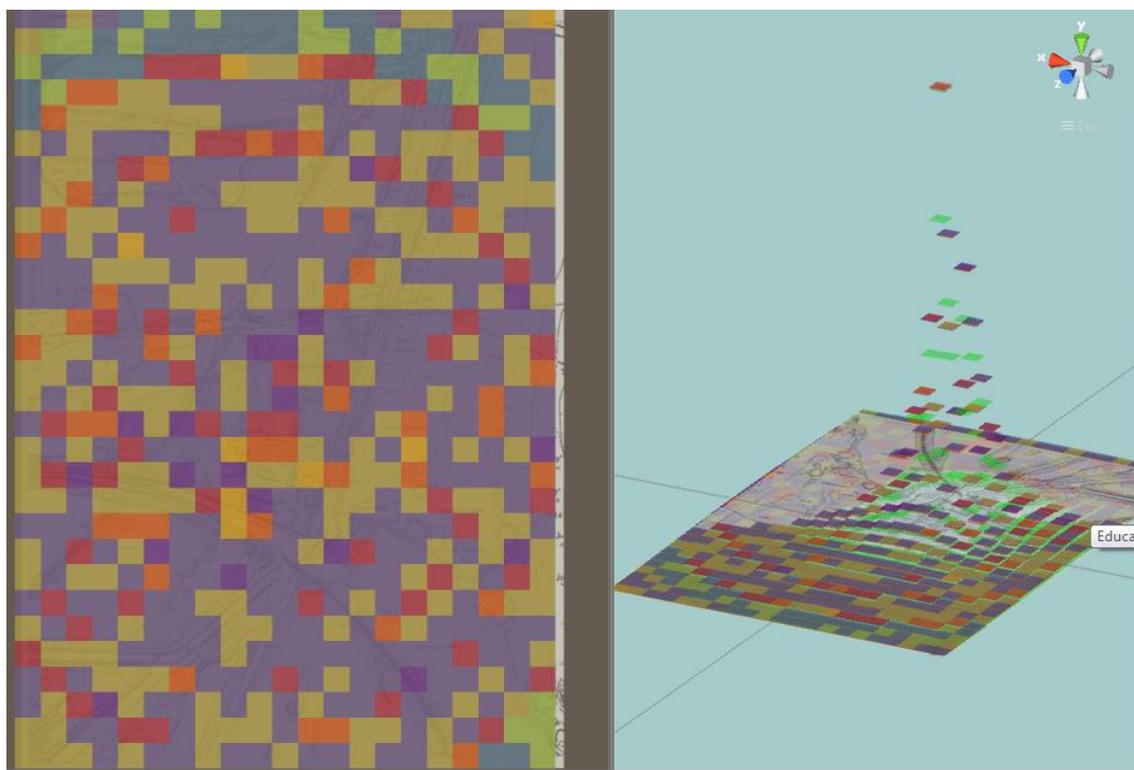


Рисунок 20 - Визуализация дискретной модели

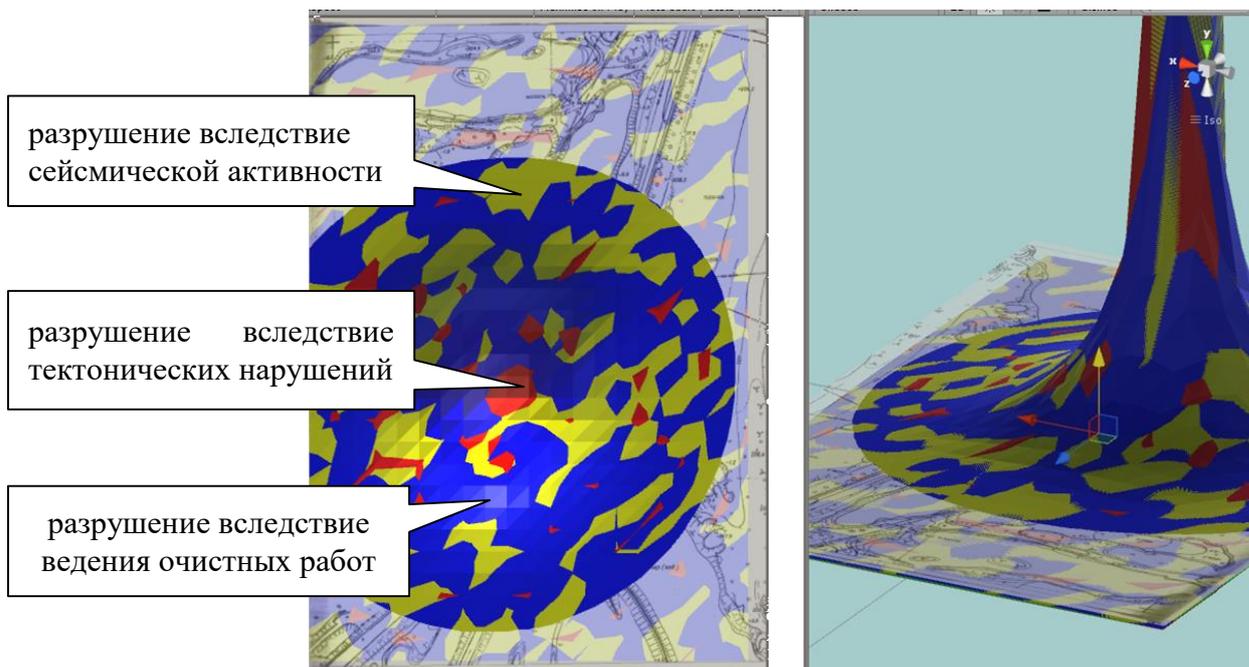


Рисунок 21 - Результат визуализации с использованием непрерывной модели

Ортогональная камера поможет избавиться от визуальных «артефактов», которые происходят из-за расположения двух поверхностей в пренебрежительно малом расстоянии друг от друга [95].

Предлагаемый способ визуализации позволяет повысить наглядность представления напряжения, а также упростит районирование и нормирование геомеханического воздействия.

### 4.3 Структура программного модуля для работы с хранилищем данных

После анализа напряженно-деформированного состояния горного массива данные, полученные в результате моделирования геомеханических процессов, помещаются в БД. Для работы с данными из БД был разработан программный модуль, предоставляющий доступ к данным и позволяющий работать с несколькими базами параллельно. При добавлении новых данных о напряженно-деформированном состоянии очередного сегмента шахты, проводится проверка «пространственной целостности». Под «пространственной целостностью» подразумевается возможность расчета

части шахтного поля (призобойные участки, очистная горная выработка, пласт или другую часть шахтного поля) на разных рабочих станциях при их постоянной синхронизации с пространством горной выработки. К примеру, у пользователя может возникнуть необходимость в более подробном изучении части горного массива. Для этого пользователь разбивает исследуемое пространство на более мелкие элементы и еще раз рассчитывает напряженно-деформированное состояние в этой области. Перед расчетом, программный модуль вычисляет сведения о ранее проделанных расчетах в ближайших областях и корректирует построенную пользователем модель. После предыдущего расчета могло произойти изменение состояния горного массива, например, произойти обрушение, в связи с этим, модуль по умолчанию использует для корректировки только актуальные данные. Если данные по области не были найдены, то будет учитываться только модель, построенная пользователем. После расчетов данные снова помещаются в базу данных, однако при этом, атрибутивные данные об элементах сопоставляются с пространственными, что позволяет каждый раз уточнять общую картину всего горного массива [83].

Программный модуль (рис.22) состоит из нескольких классов, формально разделенных на четыре группы:

- исходные (source):
  - исходный элемент;
  - сила;
- общие (common):
  - модель;
  - коллизия;
  - настройка модуля;
- результирующие (result):
  - результирующий элемент;
  - визуализация результата;

- геометрический анализ;
- базовые справочники:
  - геомеханические свойства;
  - материал.

Класс «Настройка модуля» содержит следующие атрибуты:

- Автоматически заменять силы на актуальные.
- Автоматически копировать геомеханические параметры из типа материала.
- Порог смещения при разрушении для фиксации обрушения.

Этот класс содержит основные настройки, которые используются в разных классах, но при этом не могут являться характеристикой какого-то конкретного экземпляра класса. Этот класс наполняется с помощью текстового конфигурационного файла.

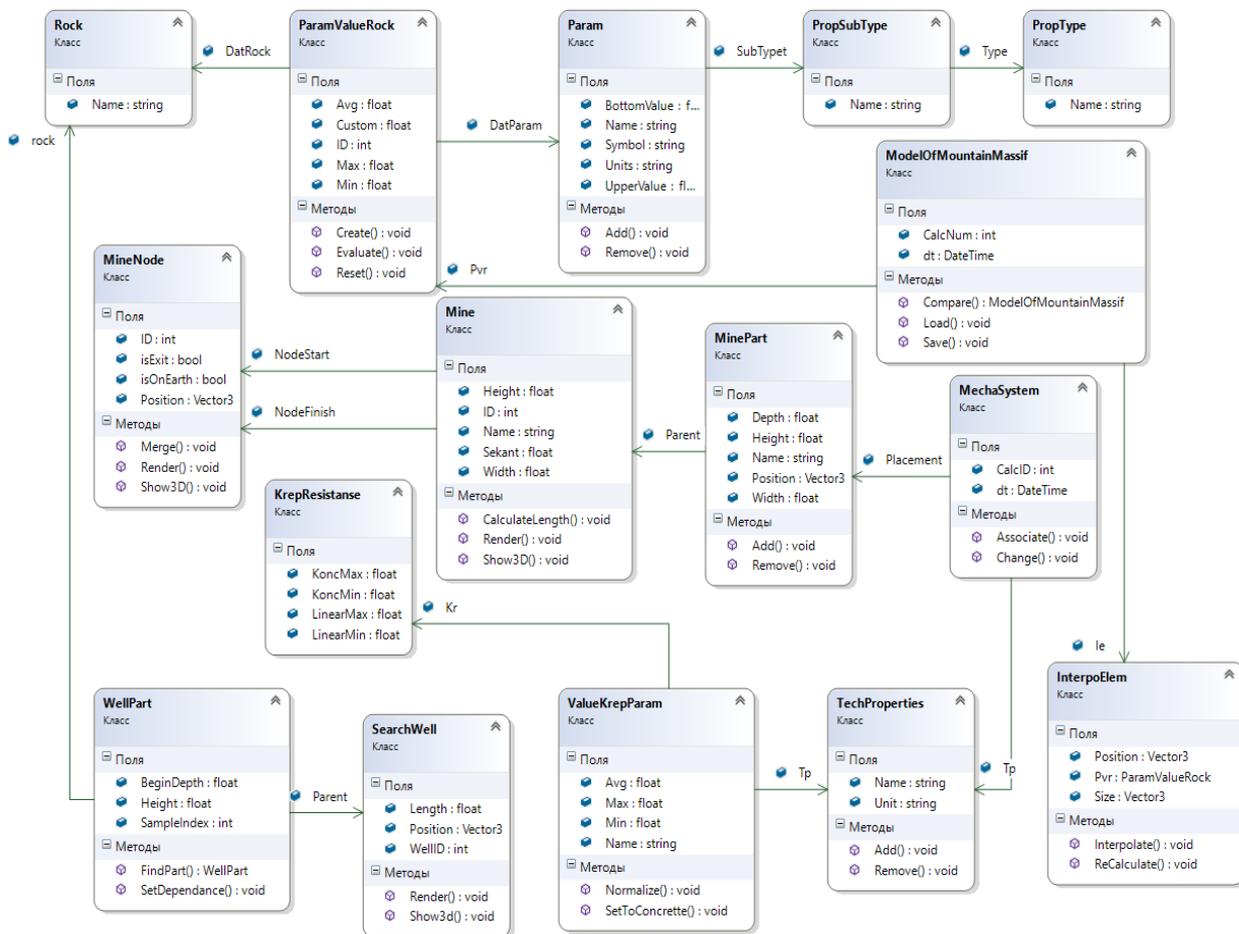


Рисунок 22 - Диаграмма классов модуля анализа НДС горного массива

Класс «Исходный элемент» программного модуля состоит из нескольких атрибутов:

- геомеханические атрибуты элемента (модуль упругости и коэффициент Пуассона);
- координата элемента относительно модели;
- координаты узлов элемента относительно модели;
- географическая координата элемента;
- географические координаты узлов элемента;
- родительский элемент;
- ссылка на массив дочерних элементов (ID контейнера);
- элемент является объединенным;
- тип материала;

Атрибут «родительский элемент» хранит ссылку – идентификационный номер элемента, внутри которого он находится. Дочерние элементы нельзя создавать «произвольно» - они создаются путем разбиения на два [79] и объединения разбитых элементов.

Тип материала может определять не только тип породы, но и, например, определять отсутствие элемента как такового для описания внутренних пустот. Так же можно с помощью этого атрибута обозначить очистной механизированный комплекс, выставив соответствующий тип материала. Данные о геомеханических свойствах автоматически (настраивается в классе «Настройка модуля») копируются из класса «тип материала» по усредненной характеристике. Связь по ссылке отсутствует, так как пользователь может указать значение геомеханического свойства, отличающегося от усредненного значения диапазона.

Класс «Исходный элемент» программного модуля содержит следующие методы:

- Подразделение (Subdivide) – рекурсивно разбивает элемент на степень двойки, превращая каждый вложенный куб в четыре внутренних куба. Относительные и географические координаты генерируются автоматически.

Геомеханические свойства копируются у родительского элемента. Текущий элемент получает индекс контейнера, а дочерние элементы получают атрибут ссылки на родительский элемент.

– Объединение (Merge) – дочерние элементы можно объединять вручную. При этом по умолчанию усредняются геомеханические атрибуты, а центр элемента выставляется в геометрический центр.

Класс «Сила» модели содержит следующие атрибуты:

- уникальный номер элемента;
- значение сил и моментов инерции по трем осям координат;
- вид силы.

Существует два вида объекта силы – это актуальная сила и гипотетическая. Если атрибут силы установлен в «актуальный», то эти силы могут быть использованы для корректировки пользовательских моделей. Гипотетическая сила – используется для проведения исследований напряжений для моделирования различных ситуаций по управлению горным массивом.

Класс «Материал» содержит следующие атрибуты:

- название материала;
- массива геомеханических свойств (справочные данные);
- массив диапазонов свойств;
- массив средних значений геомеханических свойств.

На уровне баз данных класс «Тип материала» представляет собой две таблицы, связанные между собой связью один ко многим: таблица «тип материала» и таблица «свойства типа материала». Класс осуществляет маппинг между этими таблицами, получая данные, связанные по внешним ключам, в свою структуру данных.

Класс «Геомеханические свойства» представляет собой справочник из названий возможных для выбора геомеханических свойств.

Для возможности использования одних и тех же элементов в разных моделях, был создан класс «Модель». Он позволяет создавать для каждой

модели свой уникальный набор элементов, но при этом не вызывать избыточность, добавляя одинаковые элементы.

Класс модели содержит следующие атрибуты:

- уникальный номер модели;
- дата создания;
- название модели;
- актуальна ли модель;
- тип учета актуальных сил;
- тип модели.

Дата создания и названия модели служат для ориентирования в массиве различных моделей внутри одного горного массива. Атрибут «актуальна ли модель» - это логическая переменная, определяемая пользователем. Если пользователь принял решение о том, что качество расчетов удовлетворяет реальному положению дел в секторе, то он выставляет значение «истина» для этой модели. После этого данные о модели копируются в общую базу данных на сервере, где хранятся данные о всем горном массиве. Если другой пользователь захочет выяснить сведения о данном участке горного массива, то он увидит данные других пользователей, указавших свою модель как «актуальную». Если элементы разных моделей, имеющих статус «актуальная» содержат одинаковые элементы с разными значениями напряжения, то возникает коллизия. Коллизии разрешаются администратором – он оценивает различия между моделями, при необходимости, связывается с пользователями, составившими модель, и принимает решение о закреплении значения результатов в конечном варианте актуальной модели всего горного массива.

В актуальную модель копируется всегда самое мелкое разбиение без родительских элементов. Это необходимо для разрешения коллизий между моделями по разбиению области на элементы. Однако предупреждение об этом будет записано в таблицу логирования коллизий.

Тип учета актуальных сил может быть трех видов: «не использовать», «заменять», «прибавлять».

Если выбран тип «не использовать», то силы, приложенные в актуальных моделях к элементам, участвующим в текущей модели не будут учитываться. Если выбран вид «заменять», то силы в текущей модели будут заменены силами с установленным атрибутом «актуальная сила». Если выбрано «прибавлять», то силы будут прибавлены к силам, участвующим в модели.

Тип модели может быть статическим или динамическим. Динамическая модель содержит ряд дополнительных атрибутов, которые добавляются автоматически при изменении типа модели:

- номер актуального состояния;
- количество состояний;
- текущее состояние;
- шаг передвижки механизированного комплекса;
- массив элементов отрабатываемого пласта.

Динамическая модель нужна для моделирования движения очистного комплекса в горном массиве. С каждым шагом автоматически создается объект класса «модель», для которой применяются компоненты смещения из объектов класса «результатирующий элемент», постепенно заменяются элементы из «массив элементов отрабатываемого пласта» на тип элемента «нет элемента», а элементы с типом «механизированная крепь» смещаются на значение, равное «шагу передвижки механизированного комплекса».

Класс «коллизия». Во время работы модуля могут происходить различные несоответствия, связанные с назначением двум актуальным элементам разных значений или при назначении актуальных сил с разными значениями. Класс состоит из следующих атрибутов:

- тип коллизии;
- сообщение;
- дата коллизии.

Тип коллизии сообщает, что именно необходимо разрешить – коллизию элементов, сил или моделей. Сообщение описывает, в чем именно произошло несовпадение и указывает контактные данные пользователей, из-за которых она произошла. Коллизии может разрешать только администратор системы.

Класс «Результирующий элемент» содержит следующие атрибуты:

- номер модели;
- номер элемента;
- компоненты смещений;
- компоненты напряжения;
- номер расчета.

Конструктор класса «Геометрический анализ» принимает в качестве входного атрибута экземпляр класса «Результирующий элемент» и содержит следующие атрибуты:

- ссылка на результирующий элемент;
- элемент разрушен;
- элемент обрушен;
- выброс породы.

С помощью технологии OLAP строится несколько гиперкубов – вертикального и горизонтального смещения и для вертикального и горизонтального напряжения. Эти кубы данных анализируются и сравниваются с пороговыми значениями напряжения. В случае, если горизонтально значение напряжения превышает пороговое, а смещение породы превысило критический уровень (указывается в классе настройки) модуль фиксирует разрушение породы и помечает элементы как «обрушенные». Если же напряжение в породе превысило допустимый максимальное значение диапазона (в соответствии с типом элемента), то элемент помечается как «обрушенный». Аналогичный анализ проводится для горизонтального напряжения и смещения. В случае, если горизонтальное смещение превысило предустановленного критического значения при разрушении породы это говорит о возможном «выстреливании породы» -

система помечает элемент флагом «выброс породы». Основная цель геометрического анализа – выявить зависимость геометрии горных выработок и горного массива от геометрии разрушения пород.

#### **4.4 Структура программного модуля нахождения безопасного маршрута эвакуации**

Поиск кратчайшего пути состоит из двух этапов: вычисление маршрута на этапе построения модели и вычисление маршрута в процессе ведения аварийно-спасательных работ. Концептуально оба этапа исполняются на основании одних и тех же шагов, однако существует отличие, заключающееся в использовании алгоритма нахождения кратчайшего пути. Поскольку на этапе моделирования существует возможность затратить больше времени на изучение маршрутов, то используется алгоритм Дейкстры – этот алгоритм имеет большую вычислительную сложность, однако всегда гарантированно находит кратчайший путь.

Прежде чем осуществлять расчет кратчайшего пути необходимо преобразовать сведения о горных выработках в дискретную модель, представляющую собой в упрощенном виде неориентированный взвешенный граф[87]. Для этого на этапе сбора данных осуществляется преобразование проектировочных данных о шахте в структурированный вид, разделяющий сведения о выработках на две части: данные об узлах и данные о ветвях (рис.23). Под узлом в данном случае понимается начало и конец выработки. У нескольких выработок может быть один узел, что говорит об их сопряжении. Узел содержит следующие данные: координаты в формате (x, y, z), идентификационный номер узла, а также метку. Метка узла может принимать следующие значения:

– выход - узел является одним из выходов, через который сотрудники шахты выходят на поверхность;

– поверхностный – узел имеет выход на поверхность, однако не является стандартным выходом для сотрудников, например, выход на поверхность вентиляционной выработки;

– сопряжение – метка сообщает о том, что узел не имеет сопряжения с поверхностью земли, но является сопряжением нескольких выработок;

– тупик – метка сообщает о том, что узел является концом одной ветки и не имеет других сопряжений.

Ветвь представляет собой данные о выработке – номер начального и конечного узла, название выработки, сечение (в квадратных метрах), периметр высота и ширина. Длина выработки рассчитывается как расстояние между узлами, однако в случае, если погрешность, возникающая в связи с большой кривизной выработки, выше допустимой существует возможность указать значение вручную. После того как данные структурированы они записываются в файл формата csv.

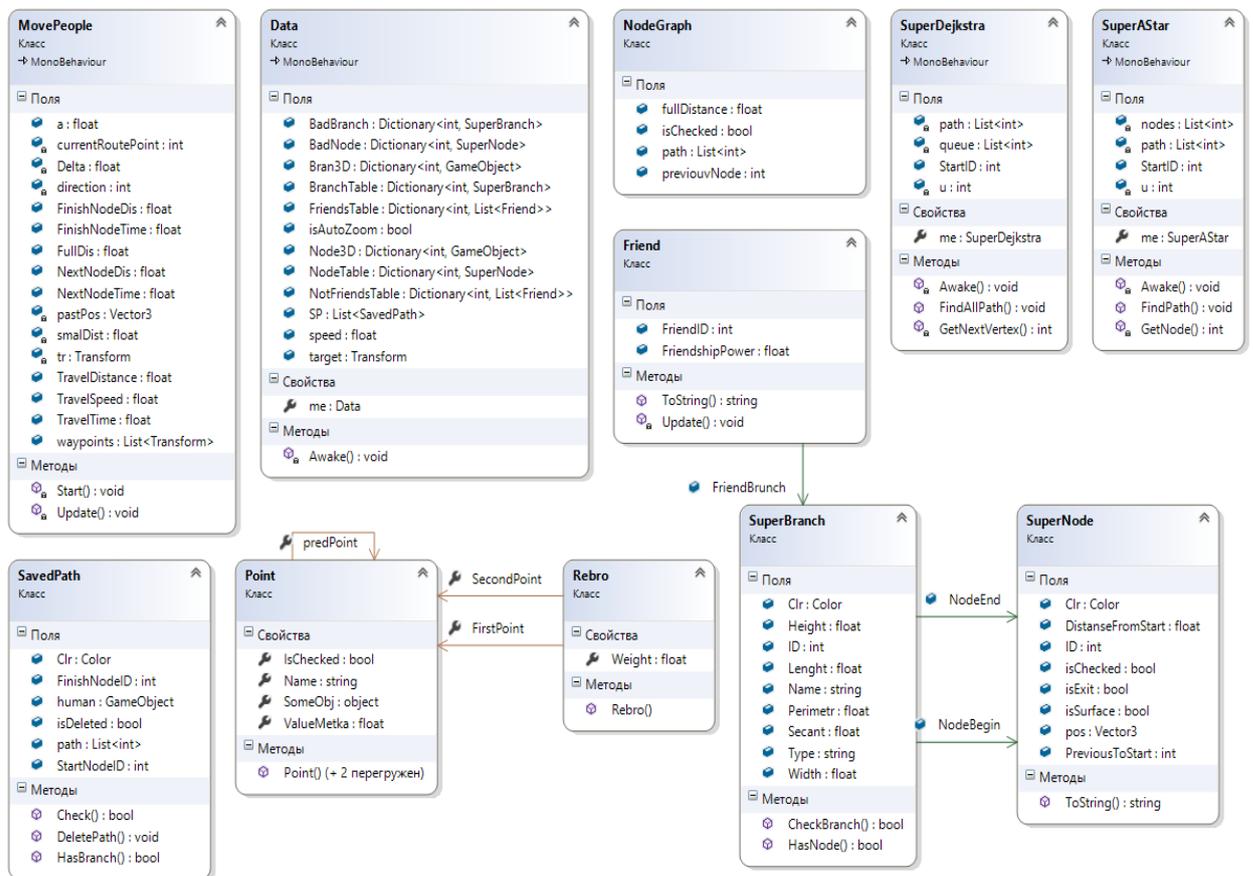


Рисунок 23 - Диаграмма классов модуля нахождения оптимального маршрута

Текстовые файлы позволяют ускорить процесс нахождения маршрута за счет уменьшения количества обращений к дисковому пространству. Базы данных не используются по той же причине – время подключения и создания выборки для обработки займет большее время по сравнению с потоковым считыванием текстового файла в оперативную память.

Перед началом нахождения кратчайшего пути необходимо указать выработки, попавшие в опасную зону. Для этого применяются геоинформационные методы, позволяющие соотнести координаты пространства зоны с повышенным напряжением (рис. 24).

После этого происходит анализ данных: какие выработки попали в опасную зону. Эти выработки помечаются как опасные. При расчете маршрута они не будут учитываться. По факту в конечном виде при считывании файла с ветвями и узлами опасные выработки загружаться не будут, что уменьшает размер конечного графа и увеличивает скорость анализа.

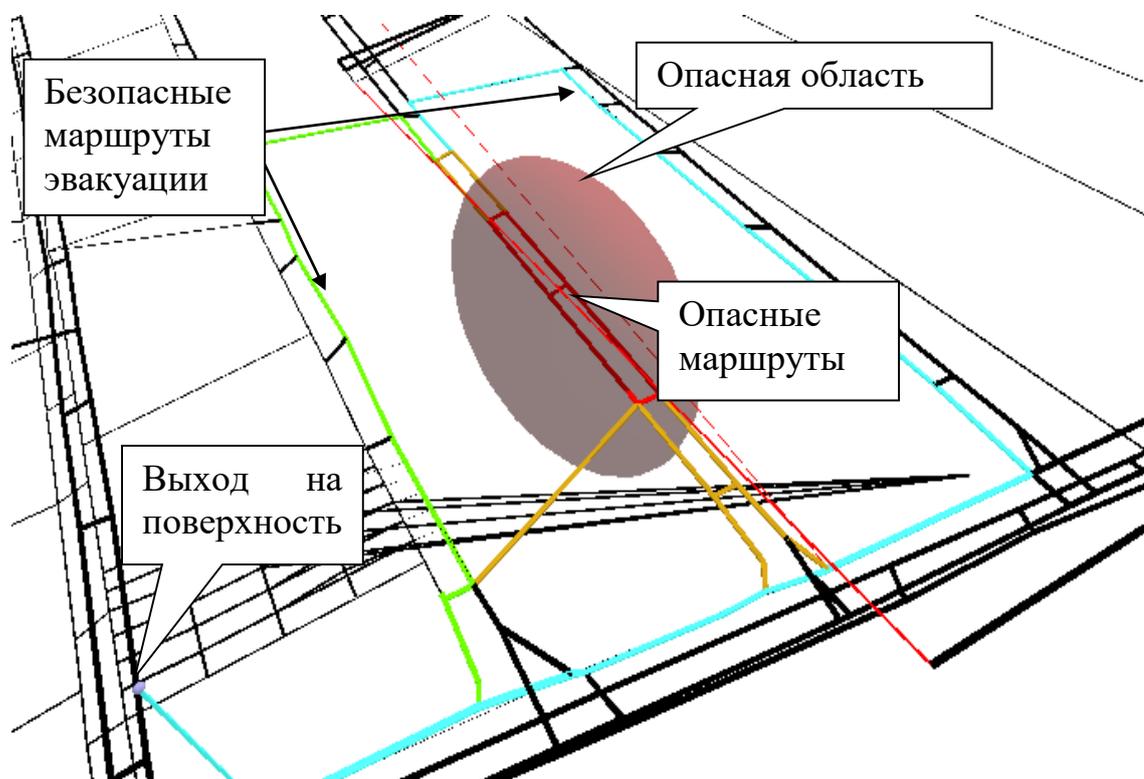


Рисунок 24 – Компьютерная визуализация совмещения трехмерной модели опасной зоны с трехмерной моделью горной выработки

После того как были подготовлены исходные файлы и были найдены «опасные» выработки горные выработки строятся в виде дискретной модели – неориентированного взвешенного графа.

При считывании данные программный модуль автоматически создает массив, элементами которого являются экземпляры классов [99].

Для реализации этой задачи было создано несколько классов.

Класс «Узел». Помимо стандартных свойств, считанных их файла добавляется несколько атрибутов:

- цвет – данные в формате (r, g, b, a) для применения цвета к трехмерному визуализированному объекту узла;
- расстояние от начала – вещественная переменная, в которой хранится значение расстояния от начала движения;
- предыдущий узел – целочисленная переменная, хранящая номер узла, предшествующий текущему для восстановления маршрута движения;
- пройден ли узел – логическая переменная-метка, сообщающая о том, что узел уже использовался для расчета маршрута (чтобы избежать появления петель в маршруте).

Класс «Ветвь». Дополнительно содержит поле «цвет» и два метода, позволяющий идентифицировать ветвь по двум узлам или проверить принадлежность узла к конкретной ветви – это позволяет ускорить алгоритм поиска нужной ветви графа.

Класс «Друг». Содержит данные о соседнем узле, расстоянии до него и номере ветви по которой осуществляется связь. Каждому узлу сопоставляется массив «друзей».

Класс «Сохраненный маршрут». Содержит последовательный массив точек узлов (маршрут), номер начала и конца узла, цвет. Необходим для хранения нескольких маршрутов в случае необходимости расчёта выхода на поверхность из нескольких точек одновременно.

Для работы с классами используются специальные структуры данных контейнерного типа, способствующих ускорению вычисления за счет специфики выполнения операция поиска элемента в массиве и добавления элемента в массив:

Обобщенный словарь (Dictionary  $\langle T, T \rangle$ ) – для хранения массива классов узлов и ветвей и сохраненных маршрутов. Ключом выступало целочисленный идентификатор ветви или узла.

Обобщенный вектор (List  $\langle T \rangle$ ) – для хранения «друзей» каждого узла.

В информационной системе очень четко разграничивается структура данных для нахождения маршрута и структура данных для визуализации. Последние занимают большой объем памяти, однако необходимы для наглядности представления данных, в связи с чем, связь между этими двумя структурами осуществляется посредством использования одинаковых ключей для одних и тех же элементов. После нахождения маршрута путь визуализируется на трехмерной модели шахты.

Перед началом работы алгоритма граф проходит «обрезку». Из контейнера, содержащего узлы, вырезаются «тупиковые» и перемещаются в отдельный контейнер. После этого осуществляется поиск принадлежащим им ветвей – они также переходят в отдельный контейнер. Это позволяет уменьшить время работы алгоритма за счет удаления изначально тупиковых маршрутов, что является попыткой смягчить возможную вырожденность графа. Однако в случае, если пользователь в ручном режиме через графический интерфейс обратится к этим узлам, они будут восстановлены в основном контейнере и будут участвовать в алгоритме поиска наряду с другими вершинами.

Абстрактный класс, реализующий алгоритм нахождения кратчайшего маршрута содержит два метода: метод, который осуществляет переход к следующей вершине и метод, проверяющий условия на соответствие вершины кратчайшему пути.

Работа второго метода состоит из следующих этапов:

– Обнуляются данные обо всех расстояниях и вершинах. Стоит еще раз отметить, что все сведения хранятся в словарях и векторах, что значительно сокращает скорость подобного рода процедур.

– Берется первая вершина и устанавливается в качестве текущей. Расстояние до финиша для неё задается равным нулю. На предыдущем шаге расстояния до финиша для всех вершин были заданы условной бесконечности.

– Поочередно перебираются все соседи текущей вершины. Расстояние до каждой задается равным всем предыдущему расстоянию плюс расстояние до этого соседа.

– Каждому соседу в параметр «предыдущий узел» записывается номер текущего узла.

– Текущая вершина помечается как пройденная.

– Запускается метод выбора следующей вершины, после чего повторяются шаги 3-6 до тех пор, пока не найдена вершина финиша, либо до тех пор, пока не будут перебраны все вершины.

Метод выбора очередной вершины в качестве входного параметра содержит критерий. В случае алгоритма Дейкстры критерием будет являться минимальное расстояние до соседа, выраженное через сумму весов ребер.

## **4.5 Разработка графического интерфейса для компьютерной программы оперативного нахождения маршрута эвакуации**

Для повышения эргономики работы с разработанным инструментом необходимо разработать удобный интерфейс, предусматривающий возможность изменения значений исходных характеристик и визуализацию результатов работы. Поскольку модель, выбранная для построения трехмерная целесообразно использовать средства разработки трехмерных полноэкранных приложений. В качестве основного инструмента был выбрана среда Unity3D, поскольку, помимо мощных средств визуализации, она

снабжена возможностью создавать программы на языке высокого уровня и связываться с базой данных.

В Unity3D существуют технологии, позволяющие оптимизировать отображение объектов на сцене за счет снижения потребляемых ресурсов на визуализацию объектов. Для достижения наилучшего качества отображения необходимо учитывать следующие характеристики:

- скорость текстурирования (fillrate);
- разрешение и количество текстур (pixelization);
- количество вершин в модели (геометрическая сложность).

Частично задачу оптимизации решает сам игровой движок (если быть точнее, то эту проблему решает один из его компонентов – графический движок). Например, в Unity3D реализована технология «Occlusion culling» благодаря которой, объекты вне поля зрения автоматически скрываются, не расходуя ресурсы GPU. Однако не стоит полностью полагаться на возможности движка - зачастую использование самописных скриптов может обеспечить лучшую производительность.

Скорость текстурирования – это количество пикселей, которое видеокарта может отобразить на экране и записать в памяти за единицу времени [57]. Уменьшить значение этой характеристики можно за счет:

- уменьшения разрешения экрана;
- упрощения шейдера;
- замедления перерисовки (например, движения света).

Чтобы визуализировать объект на экране, движок должен запустить команду графического API (например, OpenGL или Direct3D). Графический API прodelывает сложную работу при рендеринге каждого объекта на экране. Вызов одной команды рендера называется «draw call». Каждый draw call затрачивает временной ресурс работы GPU. Соответственно, чем меньше таких вызовов, тем меньше времени понадобится на то чтобы отобразить сцену на экране. На момент появления Unity3D уменьшения количества draw call'ов добивались за счет объединения нескольких объектов в один. Эта

операция называется «пакетирование» или «batching». Чем больше объектов Unity3D можно скомпоновать вместе, тем лучше будет производительность рендеринга на стороне процессора. В более новых версиях появились такие технологиями как «static batching», «dynamic batching» и «Umбра» (система отсечения невидимых поверхностей / «occlusion culling»)[58].

Уменьшить количество draw call'ов можно за счет уменьшения характеристики LoD (Level of Detail). Это осуществляется либо за счет упрощения геометрии объектов, либо просто за счет отключения объектов в момент, когда объект находится дальше радиуса видимости.

Помимо этого, разработчики Unity3D предлагают следующие советы для улучшения производительности:

- использовать как можно меньше уникальных материалов;
- использовать атласы текстур (большое изображение, в котором размещены все текстуры) вместо набора файлов текстур;
- использовать карты распределения света вместо динамического изменения света;
- снизить количество прозрачных шейдеров до минимума;
- избегать нескольких источников света на одном объекте;
- использовать паттерн «объектный пул»: вместо постоянного создания и уничтожения объектов, создать буфер для хранения и по необходимости брать объекты оттуда и возвращать обратно [59].

Скважины визуализированы с помощью технологии повторного использования объектов из заранее подготовленного набора (рис.25). Для повышения производительности эти объекты визуализируются только в момент, когда камера пользователя направлена в сторону скважин [88].

При этом можно осуществлять навигацию, повороты и осматривать скважины с любой точки на карте. Есть возможность сделать разрез в любой узловой точке. На сцене один источник света. Используются атласы текстур и оптимизированные шейдеры. Все это помогло сэкономить ресурсы без потери качества изображения на сцене и ускорить навигацию[60].

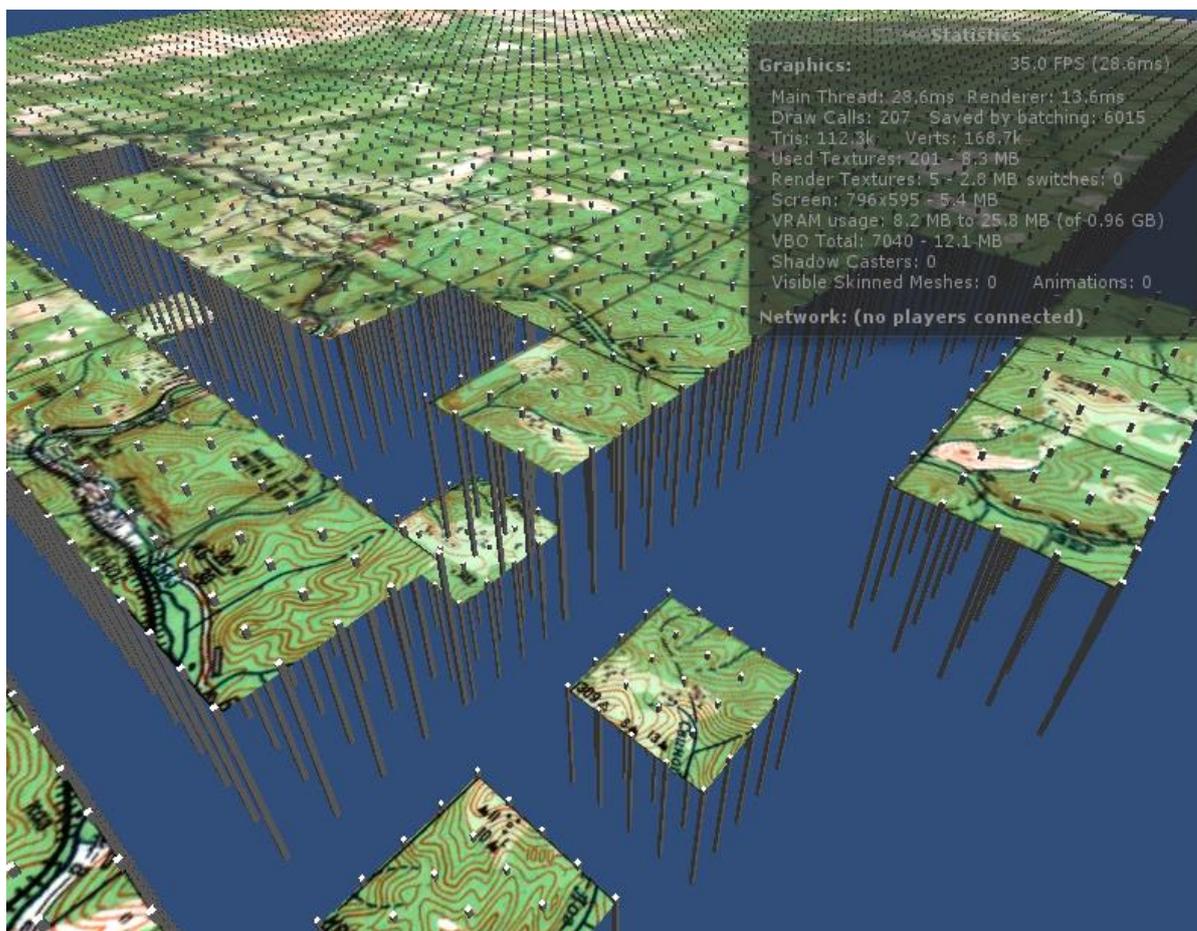


Рисунок 25 - Визуализация разведочных скважин на карте

Выработки построены на основе пространственно-атрибутивных сведений из хранилища данных. Дополнительно реализован экспорт сведений из файлов Microsoft Excel. Программно обеспечивается корректный пространственный угол и расположения выработок в углепородном массиве. Пример построения слоя горных выработок представлен на рис. 26.

Реализована возможность создания среза по любой плоскости, отображение конкретных слоев и перемещение модели в пространстве. Отображаются атрибутивные характеристики дискретности. Смоделированная система поможет пользователю подробнее рассмотреть горную выработку и подготавливает весь необходимый базовый материал для дальнейших работ с горным массивом [89]. Выработки визуализируются схематично в виде каркаса (рис.27), дискретные элементы породы в виде шестигранников, изображение совмещено с географической картой.

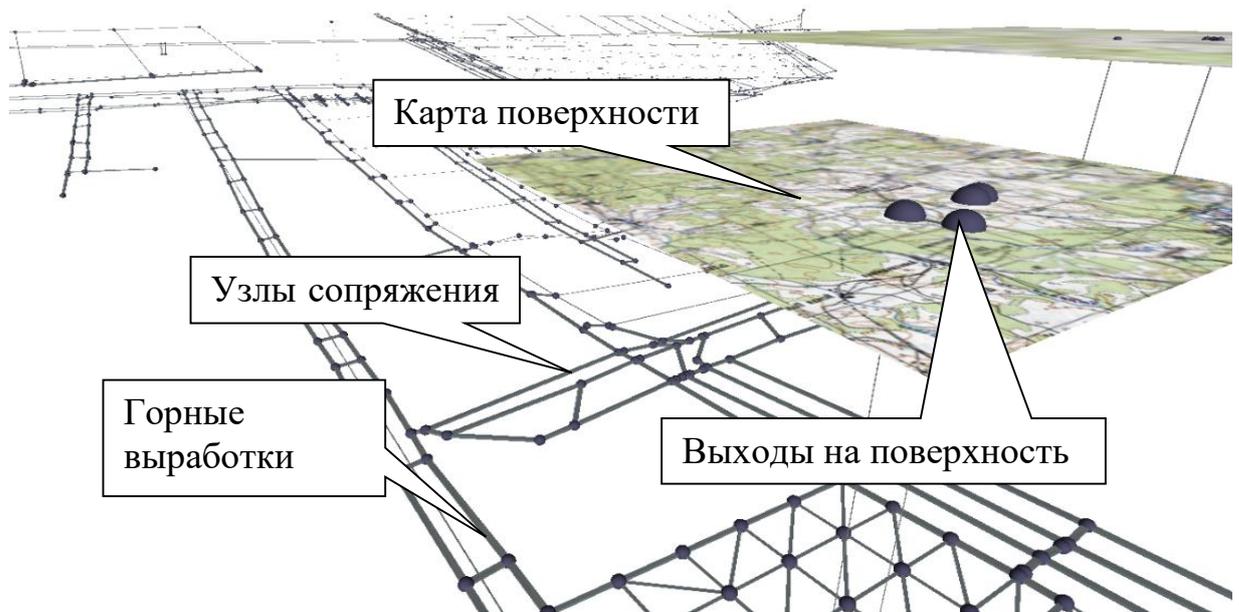


Рисунок 26 - Визуализация трехмерной модели горных выработок

Это позволяет подробнее изучить окрестности выработок и получить общее представление о характере изменений, которые могут произойти в случае продвижения очистного комплекса, а также о масштабе и соотношении размеров подземной части угольного предприятия с размерами горного массива и, в частности, с высотой угольного пласта.

Благодаря эргономичной навигации «полета» в трехмерном пространстве можно свободно перемещаться по шахте. При выборе любого элемента сообщаются все известные сведения об объекте.

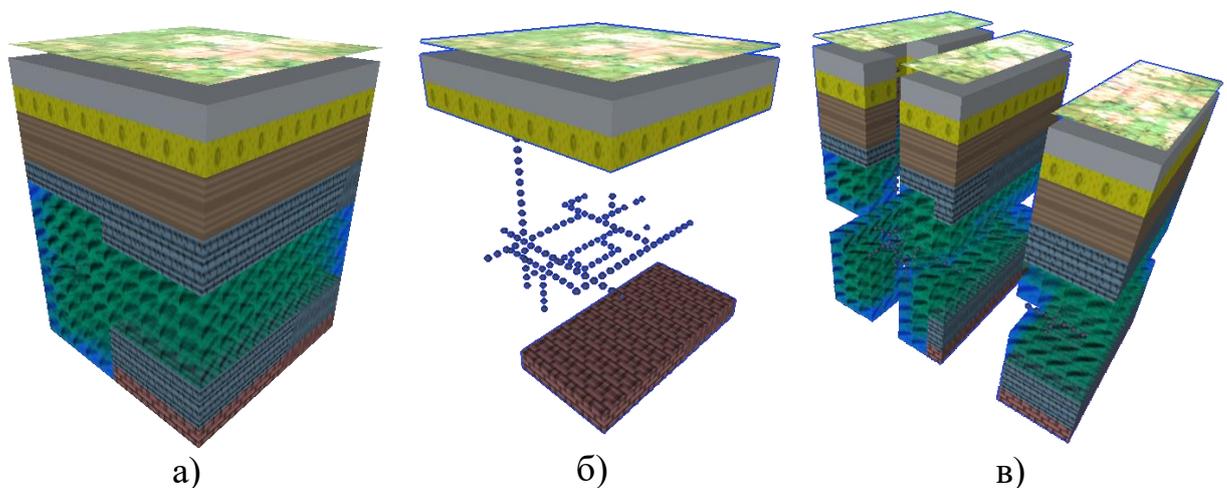


Рисунок 27 - Выемочный участок

а) - целиком б) технология слоев в) технология срезов

При двойном щелчке на объект камера приближается к объекту и фокусируется на нем.

В информационной системе предусмотрен интерактивный режим взаимодействия. Для нахождения кратчайшего пути между двумя узлами достаточно последовательно щелкнуть по ним левой кнопкой мыши, удерживая клавишу «shift» на клавиатуре (рис.28).

В случае обнаружения обрушения на одном из маршрутов существует возможность пометить выработку как аварийную в ручном режиме. Для этого нужно щелкнуть левой клавишей мыши на ветке или узле и нажать клавишу «delete» на клавиатуре. После этого все маршруты, в которые были задействованы удаленные ветви или узлы будут последовательно пересчитаны. Эта методика работы позволит осуществлять информационную поддержку во время ведения аварийно-спасательных работ, а также сокращает время принятия решения в случае возникновения нештатной ситуации.

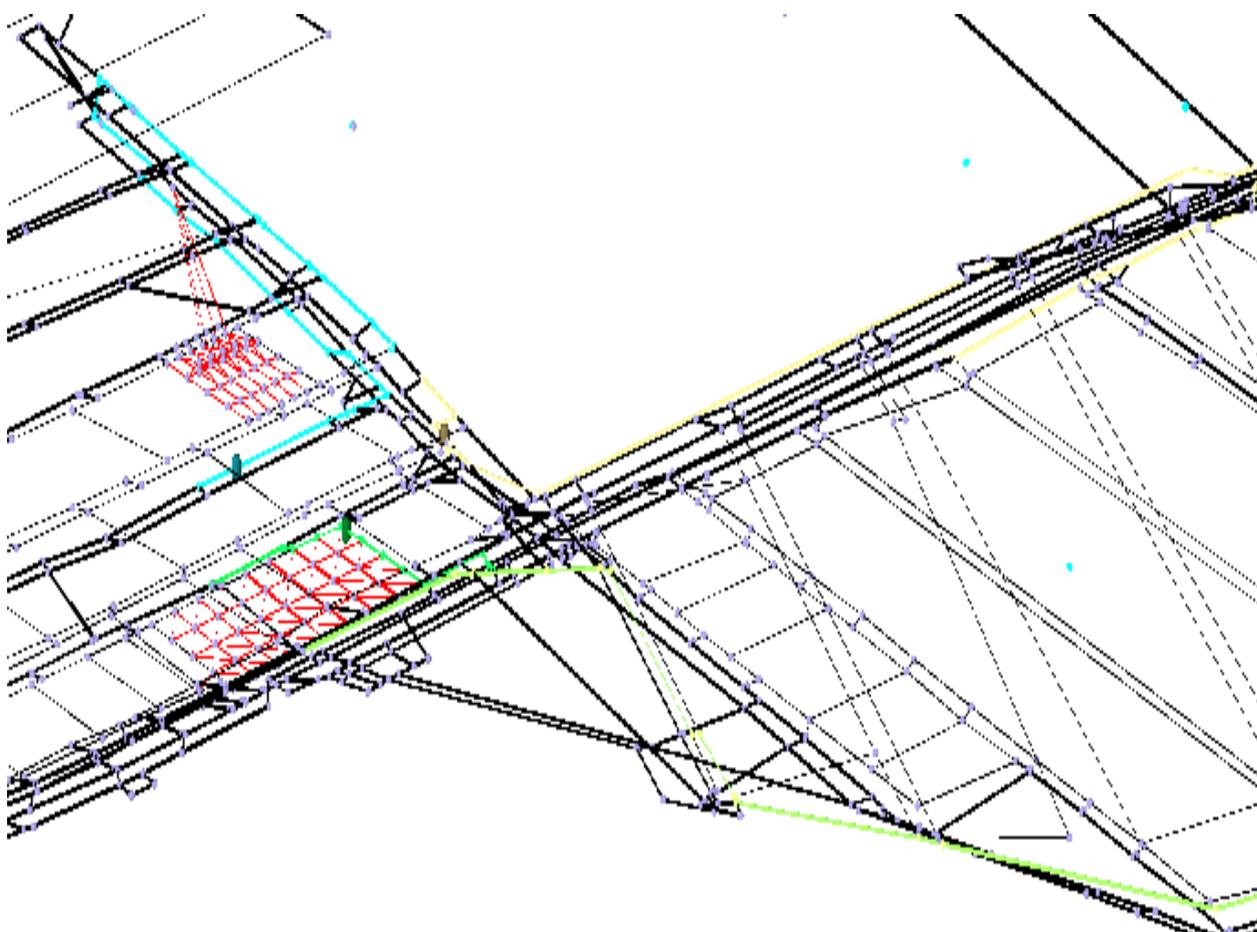


Рисунок 28 - Визуализация рациональных маршрутов

## **4.6 Апробация методики определения маршрутов эвакуации**

Добыча угля производится на Алардинском месторождении каменного угля, которое расположено в Кондомском геолого-экономическом районе Кузбасса и административно входит в состав города Осинники. Балансовые запасы каменного угля по шахте на 01.01.2014г. составили 643660 тысяч тонн. Промышленные запасы по шахте категории по состоянию на 01.01.2014г. составляют 434990 тысяч тонн. Категория шахты по газу: сверхкатегорная. Абсолютная газообильность 162,68 м3/мин. Относительная газообильность составляет 157,7 м3/т. Шахта «Алардинская» имеет около 1987 выработок, 369 из которых относятся к вентиляционным. Количество узлов, образованных в результате сопряжения горных выработок, составляет около 1152 шт.

В разрезе угленосных отложений месторождения вскрыто до 34 пластов угля, в том числе 16 рабочей мощности. Строение пластов чаще всего сложное, но весьма тонкие; тонкие средней мощности имеют в основном простое строение. Пласты сложного строения включают от 2 до 6 породных прослоев суммарной мощности до 1.5м. Глубина залегания пластов угля составляет до горизонта -450 м.; мощность и угол падения пластов - от 4,2 м. до 10,0 м. и угол падения 14-18° [104].

В качестве объекта исследования был выбран участок «Алардинский Восточный 2», который расположен в Кондомском ГЭР Кузбасса в северо-восточной части Алардинского каменноугольного месторождения. По результатам ранее проведенных геологоразведочных работ на площади участка пробурено 55 скважин объемом 15194п.м. Плотность разведочной сети составила 50 скв/кв.км. Продуктивные отложения представлены кемеровской свитой балахонской серии пермского возраста. Участок приурочен к замковой части и восточному крылу Алардинской синклинали.

Угленосная толща имеет субмеридиональное простирание и моноклиналиное падение на северо-запад (14-16 градусов). По сложности

геологического строения участок относится к 1-ой группе. Угленосные отложения участка склонны к бифуркации и с учетом расщепления включают 12 пластов угля: 1, 3-3а, 3, 3а, 6, 7-7а, 7а, 7, 7-7а-9, 7а-9, 9, 9а. В соответствии с общепринятыми параметрами кондиций нецелесообразна разработка пластов 3а, 7а, 7-7а. На оцениваемой площади все кондиционные пласты являются выдержанными; к пластам со средней мощностью относятся 1,7 и 9а, к мощным - 3,3-3а,6,7а-9,7-7а-9,9. Мощность вскрытых угленосных отложений участка составляет в среднем 199м, общая угленосность 14,2%, рабочая 13,8%. Угли имеют высокую степень метаморфизма IV-V и в соответствии с ГОСТом 25543-88 относятся к маркам ОС (пласт 1), КС (пласты 3,3-3а), ТС (пласты 3,6,7,9,9а), Т (пласты 9,7а-9,7-7а-9). Зольность угольных пачек изменяется от 9,1 до 20%, зольность с учетом засорения внутрипластовыми породными прослоями 9,2-29,8%.

Обогащаемость углей изменяется от средней до очень трудной. Угли пластов марок Т и ТС являются высококачественным энергетическим топливом; угли марок ОС и КС могут использоваться для коксования. Содержание в углях потенциально токсичных элементов не превышает установленных норм. Гидрогеологические условия участка простые, благоприятные для отработки угля. Прогнозное состояние кровель и почв угольных пластов следует считать благоприятным для их промышленного освоения. Метаноносность угольных пластов на участке возрастает с увеличением глубины залегания угольных пластов и достигает 22,4 куб.м/т.с.б.м. на нижнем горизонте оценки +100м. Количество запасов марочных углей по участку в лицензионных границах составляет 23121 тыс.т по категориям А+В+С1 [105].

Экспериментальной базой для проведения исследований являются ретроспективные данные участка «Алардинский Восточный 2» шахты «Алардинская». Геолого-экономический район, в котором находится участок месторождения каменных углей расположен на крайнем юге Кузнецкого

бассейна. Геологическое строение его изучено достаточно детально и подробно изложено в монографии «Угольная база России» [103].

Продуктивные отложения участка относятся к Кемеровской свите верхнебалахонской подсерии и Балахонской серии нижнепермского возраста. Нижняя граница свиты проходит по почве пласта 11-12, верхняя – зона древней коры выветривания, расположенная в 30-40 м выше кровли пласта 1.

Пласт 3<sup>а</sup> залегает в 55-57 метров стратиграфически ниже пласта 1. В границах участка пласт распространен на ограниченной площади в его крайней юго-западной части. Пласт 3<sup>а</sup> относительно выдержан по мощности, которая изменяется в пределах от 0,94 метров до 1,69 метров при среднем значении 1,36 метров.

Строение пласта от простого до умеренно сложного (1-3 породных прослоя), представленных преимущественно алевролитами, реже углистыми породами и угольными почками суммарная мощность которых изменяется в пределах от 0,05 до 0,35 м. По отдельным пластопересечениям имеет место ложная кровля, представленная углистыми породами мощностью 0,10 м. В непосредственной кровле и почве залегают преимущественно мелкозернистые алевролиты, в единичных случаях и в кровле и в почве отмечается наличие конкреций. Краткая характеристика пласта приводится в табл. 6.

На пласте 3<sup>а</sup> принята система разработки длинными столбами по простиранию (ДСО). Разработка ведется по целиковой и бесцеликовой схемам, а именно один штрек (вентиляционный или конвейерный) в процессе отработки лавы поддерживается и служит для следующей лавы.

Штрека проводятся в присечку с ранее отработанными лавами. Отработка всех лав ведется с полным обрушением пород кровли в выработанное пространство. Размеры выемочных участков зависят от мощности пласта и расстояния между уклонами, ограничивающими поле. Длина лав по падению изменяется в пределах от 220 до 300 м, а по простиранию 850 - 2750 м.

Физико-механические свойства горных пород пласта 3<sup>а</sup> участка  
«Алардинский Восточный 2»

Показатели	Горизонт -300(абс.)		
	Основная кровля (песчаник)	Непосредственная кровля (песчаник)	Непосредственная почва (алевролит)
1	2	3	4
<b>Водно-физические свойства горны пород</b>			
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,70	2,70	2,68
Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	2,53	2,51	2,52
Общая пористость, %	6,43	7,23	5,48
Водопоглощение, %	2,12	2,2	2,31
Влажность, %	0,74	0,80	1,16
Набухание, %	0,46	0,15	0,23
<b>Механические свойства горны пород</b>			
Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	64,2	63,7	48,9
Предел прочности при одноосном растяжении, МПа	7,6	7,6	4,7
Угол внутреннего трения, град.	37	38	42
Коэффициент крепости по Протоdjяконову	6	6	6
Средний коэффициент абразивности	1,80	1,20	0,58
<b>Упругие свойства</b>			
Скорость упругих волн, м/сек :			
Продольной	3640	3662	3707
Поперечной	2147	2222	2122
Модуль Юнга, Ех10 <sup>-10</sup> ПА	2,91	2,96	2,86
Модуль сдвига, Ех10 <sup>-10</sup> ПА	1,19	1,23	1,15
Коэффициент Пуассона	0,24	0,21	0,25

Время подготовки сведений, необходимых для расчета мероприятий плана ликвидации аварий составило 5 рабочих дней и определялось количеством исходных данных. Поскольку все необходимые материалы, представленные в виде чертежей и таблиц, имелись в наличии, то требовалось только осуществить их перенос в хранилище данных в установленном формате. При проведении расчетов в плане ликвидации аварий периодически проводились консультации с сотрудниками из штата пылевентиляционной службы, в связи с чем время расчета и время подготовки можно считать достоверным.

Исследование показало, что временные затраты на вычисление одного маршрута эвакуации по предлагаемой методике, после внесения всех необходимых данных от момента начала работы с программным комплексом до получения результата, пригодного для использования в позиции ПЛА, составляет 7-9 минут. Всего в плане содержится 57 позиций. Среднее время на составление одной позиции плана ликвидации аварии по методике, используемой на шахте, составляет 2-3 часа из которых около 40 минут требуется главному инженеру для составления маршрута.

Таким образом, общая экономия времени от использования разработанной методики составляет от 17% до 26% на позицию, т.е. примерно 21% на разработку всего плана ликвидации аварии. При этом, было обнаружено 5 позиций, содержащих принципиально новые решения, что связано с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива, которое не учитывалось предварительно (рис.29).

Сравнение маршрутов позиций в ПЛА, составленных вручную с маршрутами, определёнными с помощью разработанного программного комплекса показывает, что в более чем 90% случаев выбираемые маршруты были аналогичны. В остальных случаях, т.е. когда маршруты, генерируемые программой, не совпадали с выбираемыми главным инженером шахты, это вызывалось двоякой причиной. Примерно в 7% случаях неправильно была обнаружена ошибка в подготовленных исходных данных, т.е. сформированная

геоинформационная модель шахты при аварии не соответствовала реальному объекту.

В остальных случаях несовпадение рекомендаций обуславливалось ошибками составления или неучтенным факторами безопасности.

Таким образом, степень сходимости результатов, полученных при составлении маршрутов эвакуации в оперативной части плана ликвидации аварий в классической методике, принятой руководством шахты, и результатов, полученных с использованием предлагаемой методики, достаточно высока. При этом в предлагаемой методике были учтены характеристики, описывающие геомеханическое состояние угленосного массива, что позволяет увеличить достоверность полученных результатов.

Улучшен способ представления данных, посредством визуализации результатов определения маршрута в виде трехмерного компьютерного изображения. Главному инженеру шахты предоставляется возможность моделирования аварийных ситуаций, в том числе происходящих параллельно (на различных участках, при отработке различных пластов) для составления альтернативных вариантов маршрута эвакуации горнорабочих.

При корректировке данных о горных пикетах, в результате отработки угольных пластов, не требуется обновлять данные всей компьютерной модели, т.к. они являются основой для последующих вычислений.

Если при повторном вычисления маршрута эвакуации работников, будет обнаружено, что его часть совпадает с одной из предыдущих итераций обновления геоинформационной модели, а ветви, задействованные в этом маршруте, не претерпели изменений, то вместо пересчета каждой ветви будет использоваться результат предыдущих вычислений для этого сегмента.

Такой подход позволяет уменьшить время вычисления маршрута для актуализированной модели шахты на величину от 53% до 99% (в случае полного совпадения маршрута), т.е. в среднем на 76% за весь жизненный цикл программного комплекса.

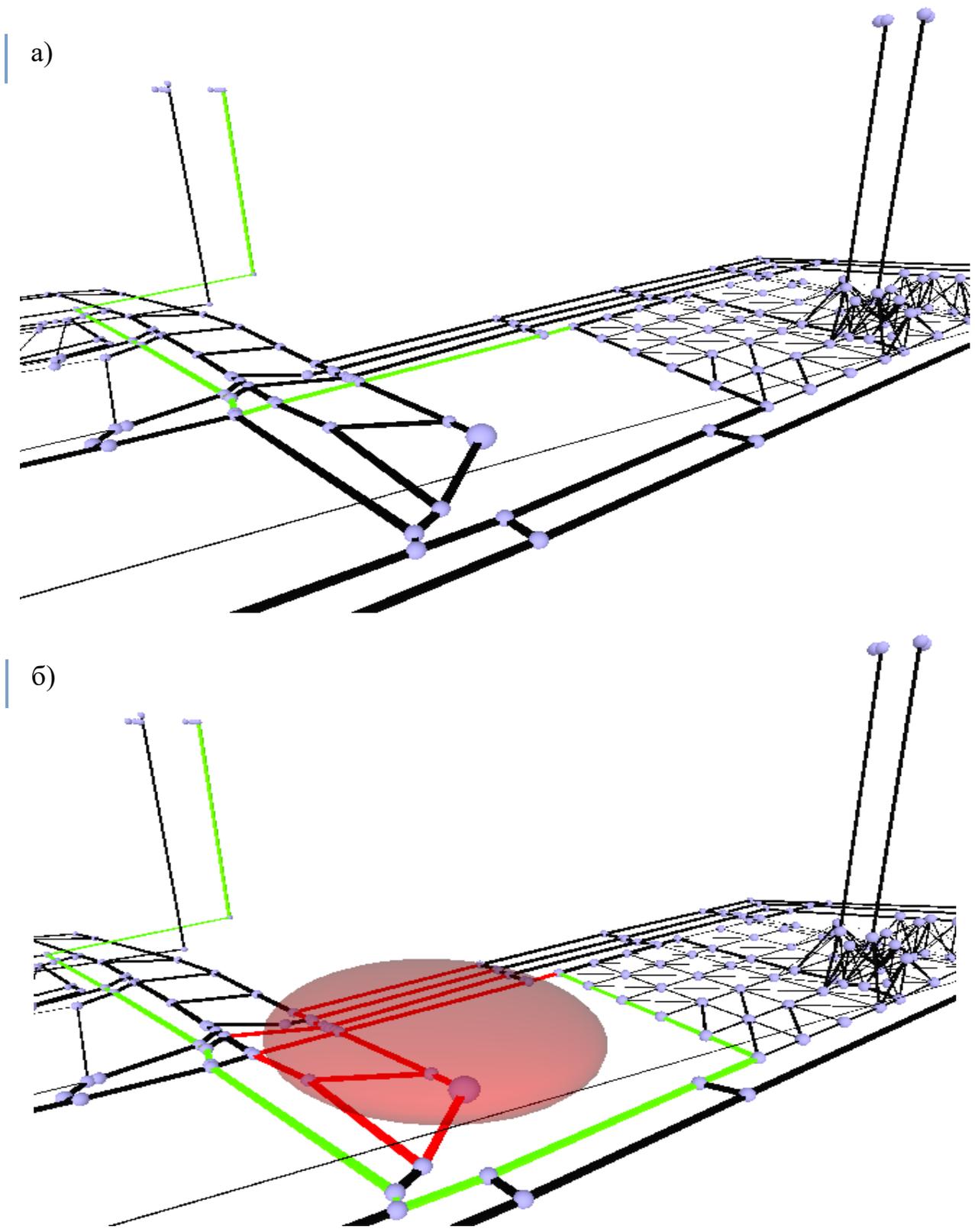


Рисунок 29 – Маршрут эвакуации работников на шахте «Алардинская»:

а) предложенный в плане ликвидации аварии,

б) рассчитанный на основе предлагаемой методики

Помимо исследованных данных шахты «Алардинская» был проведен анализ аварии на шахте «Тайжна» по ретроспективным материалам. Доступ к плану ликвидации аварий шахты «Тайжна» от 2014 г. ограничен. Однако данных по аварийному участку было достаточно для оценки геомеханического состояния горного массива и вычисления уровня риска передвижения по возможным для эвакуации горным выработкам. В результате анализа данных было выявлено, что уровень риска при передвижении по наиболее безопасному маршруту, возможному для выхода на поверхность, составлял более 60%, что является достаточным уровнем опасности для проведения дополнительных процедур по повышению безопасности ведения горных работ.

### **Выводы по главе**

Разработанная компьютерная модель реализована в виде комплекса программ, который позволяет проводить предварительное планирование и оперативную корректировку рациональных маршрутов эвакуации с рабочего места диспетчера.

Программное обеспечение использует распределенную систему хранения данных и обладает средством трехмерной визуализации для упрощения работы с компьютерной моделью.

Используемое в реализации хранилище данных предоставляет возможность формирования OLAP-анализа для получения зон опасного напряжения в окрестностях горных выработок.

## **Заключение**

В диссертации решена актуальная научно-практическая задача обеспечения информационной поддержки принятия управленческих решений при разработке и вводе в действие плана ликвидации аварий на горном предприятии, с учетом изменяющихся геомеханических ситуаций, для обоснования безопасности маршрутов эвакуации горнорабочих в целях предотвращения и уменьшения последствий ЧС.

**Основные научные и практические результаты**, полученные автором в ходе выполнения работы:

1. Разработана геоинформационная модель выбора маршрута эвакуации на основе периодически обновляемых пространственно-определенных данных о напряженно-деформированном состоянии угленосного массива, геометрии горных выработок и физических данных для составления позиций плана ликвидации аварий угольных шахт.

2. Разработана методика выбора и обоснования рационального маршрута эвакуации горнорабочих, учитывающая сведения о концентрации метана и вредных газов, скорости, направления движения, температуры и влажности воздуха в горных выработках.

3. Разработан способ корректировки маршрутов эвакуации из угольных шахт, позволяющий моделировать ситуации ограничения возможности передвижения по горной выработке с последующим пересчетом всех затронутых маршрутов эвакуации.

4. Разработан алгоритм вычисления рационального маршрута эвакуации, использующий кумулятивные результаты предыдущих итераций анализа атрибутивно-пространственных данных об угольной шахте по мере обновления топологии горных выработок, что позволяет сократить объем вычислений на 76% по сравнению с первичным расчетом.

5. Разработан способ оценки, обосновывающий безопасность выбранного пути выхода на поверхность посредством вычисления отношения

времени эвакуации к времени ресурса самоспасателя, позволяющий вычислить риск эвакуации индивидуально для каждого горнорабочего.

6. Разработано программное обеспечение для проведения геомоделирования маршрутов эвакуации горнорабочих, предоставляющее информационную поддержку при составлении позиций плана ликвидации аварий угольных шахт.

7. В разработанном программном обеспечении реализован открытый программный интерфейс, позволяющий использовать внешние источники данных для уменьшения времени внедрения в эксплуатацию на угольном предприятии за счет пропуска этапа первичного сбора и структуризации данных.

## Список литературы

1. В 2016 году в Кузбассе добыли почти 330 миллионов тонн угля [Электронный ресурс] // Журнал о жизни в Кузбассе "Сибдепо": [сайт]. [2016]. URL: <http://sibdepo.ru/news/> (дата обращения: 18.07.2016).
2. Характеристика Кузнецкого угольного бассейна, добыча угля в кузнецком бассейне [Электронный ресурс] // Промышленная компания «РосУголь»: [сайт]. [2009]. URL: <http://www.roscoal.ru/content/press-centr/informaciya-dlya-vas/harakteristika-kuzneckogo-ugolnogo-basseina-dobycha-uglya-v-kuzneckom-basseine/> (дата обращения: 18.07.2016).
3. Статистика министерства энергетики [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации: [сайт]. URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (дата обращения: 13.04.2017)
4. Экономика России, цифры и факты. Часть 5 Угольная промышленность [Электронный ресурс] // Аналитический портал UTMagazine: [сайт]. URL: <http://utmagazine.ru/posts/10449-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-5-ugolnaya-promyshlennost> (дата обращения: 18.07.2016).
5. Мазикин, В. П. Угольная отрасль России и Кузбасса: состояние и перспективы / В. П. Мазикин // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: материалы VI Международной научно-практической конференции. Кемерово, ГУ КузГТУ, 15 – 16 ноября 2005 г. / отв. ред. Ю. А. Антонов. – Кемерово, 2005.
6. Кемеровостат [Электронный ресурс] // Территориальный орган федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области [сайт]. URL: [http://kemerovostat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/kemerovostat/ru](http://kemerovostat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/kemerovostat/ru) (дата обращения: 18.07.2016).
7. Аварии на шахтах Кузбасса в 2010-2014 годах [Электронный ресурс] // РИА Новости: [сайт]. URL: <http://ria.ru/spravka/20140317/999912651.html> (дата обращения: 18.07.2016).

8. Аварии на шахтах России [Электронный ресурс] // Шахтерская энциклопедия MiningWiki: [сайт]. URL: [http://miningwiki.ru/wiki/Список:Аварии\\_на\\_шахтах\\_России](http://miningwiki.ru/wiki/Список:Аварии_на_шахтах_России) (дата обращения: 18.07.2016).

9. Крупнейшие аварии на шахтах России [Электронный ресурс] // Информационный портал РБК [сайт]. URL: <http://www.rbc.ru/incidents/19/03/2007/97298.shtml> (дата обращения: 18.07.2016).

10. Павлов А. Ф., Ларин Н. И. Категории опасности угольных шахт // ГИАБ. 2000. №7 С.142-145.

11. Скочинский А.А. Современное состояние изученности проблемы внезапных выбросов угля и газа в шахтах. В сб. Научные исследования в области борьбы с внезапными выбросами угля и газа. – М.: Углетехиздат, 1958. – С. 5-15.

12. Малинникова О.Н., Фейт Г.Н. Эффект образования метана и дополнительной сорбции при разрушении газонасыщенного угля в условиях объемного напряженного состояния. М., МГГУ, ГИАБ, 2004, 8.

13. Казанин, О.И., Сидоренко А.А, Семенцов В.В. Геомеханическое обоснование параметров разработки мощных крутых пластов системами с подэтажным обрушением и выпуском угля в условиях Прокопьевско-Киселевского месторождения // ГИАБ. 2013. №4 С.15-21.

14. О внесении изменений в приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 апреля 2012 г. N 233 "Об утверждении областей аттестации (проверки знаний) руководителей и специалистов организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору" [Электронный ресурс]: Приказ Ростехнадзора от 05.12.2014 N 546. – Режим доступа: Система Гарант

15. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. РД 05-350-00.

Государственные предприятия Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2013, 303 с.

16. Шабаров А. Н., Сидоров В. С., Кротов Н. В. Активные способы управления горным и газовым давлением при отработке свит пластов // ГИАБ. 1998. №6 С.170-173.

17. Чурадзе М. В. Способы гидравлического воздействия на угольные пласты для борьбы с внезапными выбросами угля и газа // ГИАБ. 2000. №8 С.60-63.

18. Назарова Л. А., Фрейдин А. М., Алимсеитова Ж. К. Геомеханическое обоснование порядка отработки свиты пологопадающих залежей камерно-столбовой системой разработки // ГИАБ. 2007. №12 С.108-118.

19. Хижняк Л.Т., Шемякина Н.В., Пономаренко А.А. Новые нормы амортизации как способ обеспечения шахт современным оборудованием // Экономика промышленности. 2009. №2 (45) С.154-163.

20. Неверов, А.А., Неверов С.А. К вопросу об автоматизации очистных работ при освоении систем разработки с обрушением и закладкой // Вестник КузГТУ. 2010. №4 С.3-10.

21. Савенко Л. В., Дерновая Е. А. К вопросу об управлении газовыделением угольного пласта при его гидрообработке // ГИАБ. 2007. №1 С.276-290.

22. Орешкин А. В., Колесниченко Е. А. Повышение безопасности работ во время гидровывывания скважин на участках пласта с локальными скоплениями метана // ГИАБ. 2000. №2 С.217-219.

23. Андриевский А. П. Физико-техническое обоснование параметров разрушения горного массива взрывом удлиненных зарядов // ГИАБ. 2010. №2 С.385-387.

24. Способы проведения подготовительных выработок [Электронный ресурс] // CoalGuide. Угольная промышленность [сайт]. URL: <http://coalguide.ru/podgotovitelnie-raboti/164-sposoby-provedeniya-podgotovitelnykh-vyrabotok/> (дата обращения: 18.07.2016).

25. Симановский Ю.А., Барабанщикова С.В. Системы автоматизированного табельного учета и определения местоположения персонала и техники в шахтах и на рудниках в комплексе «Талнах» [Электронный ресурс]: Журнал "Горная Промышленность" №3 2006 – Режим доступа: <http://www.mining-media.ru/ru/article/prombez/1093-sistemy-avtomatizirovannogo-tabelnogo-ucheta-i-opredeleniya-mestopolozheniya-personala-i-tekhniki-v-shakhtakh-i-na-rudnikakh-v-komplekse-talnakh> (дата обращения: 18.07.2016).

26. Лапин Э.С., Писецкий В.Б., Бабенко А.Г., Патрушев Ю.В. «Микон-Гео» - система оперативного обнаружения и контроля состояния зон развития опасных геогазодинамических явлений при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом // Безопасность труда в промышленности 2012 №4 С.18-22.

27. Семенов М.А., Иванов С.Л. Беспроводная связь с подземными выработками на горных предприятиях // «Вопросы науки и техники»: материалы международной заочной научно-практической конференции. Часть I. (16 января 2012 г.) — Новосибирск: Изд. «ЭКОР-книга», 2012. – С.76-79.

28. Earth Science and GIS Software [Электронный ресурс]: RockWare Режим доступа: <https://www.rockware.com/> (дата обращения: 18.07.2016)

29. Vulcan: Номерpage [Электронный ресурс]: Vulcan - Режим доступа:<http://www.vulcan.com/> (дата обращения: 18.07.2016)

30. Maptek Vulcan [Электронный ресурс]: Maptek - Режим доступа: <http://www.maptek.com/products/vulcan/> (дата обращения: 18.07.2016)

31. Geovia Surpac [Электронный ресурс]: Geovia - Режим доступа: <http://www.geovia.com/products/surpac> (дата обращения: 18.07.2016)

32. Господариков А.П., Зацепин М.А. Расчет напряженного состояния основной кровли соляного пласта при оптимальном выборе рациональных параметров технологических схем // Сборник трудов «Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела» под ред. проф. Черныха К.Ф., СПб, вып. 8, 2004. – с.31-38.

33. Зацепин М.А. Математическое моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния пологозалегающего массива горных пород // Вестн. С.-Петерб. ун-та, сер.10: Прикладная математика, информатика, процессы управления, вып. 1, 2009. - с.68-73.

34. Павлова Л. Д., Скуров А. Г. Разработка алгоритма прогноза напряженно-деформированного состояния в окрестности подготовительного забоя горной выработки // ГИАБ . 2002. №4. С.125.

35. Козырев А.А. Геомеханическое обоснование безопасности отработки месторождений в удароопасных условиях. Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения шеересурсов. Апатиты, СПб., с. 251-264, 2011.

36. Трушин, С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи / С. И. Трушин.— М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008.— 256 с..

37. Зыков, А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. - М.: Книга по требованию, 2012. - 541 с.

38. Кормен, Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Кормен, Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. — 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2006. — 1296 с.

39. Moore, E. F. (1959), The shortest path through a maze. In Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching, Harvard University Press, pp. 285–292

40. Steven M. Rubin. Computer Aids for VLSI Design. — 1994.

41. Wai Kai Chen. The Circuits and Filters Handbook. — 2nd ed. — 2003. — P. 1372—1374. — 2961 p.

42. Frank Rubin The Lee path connection algorithm // IEEE Transactions on Computers. — 1974.

43. Поиск пути в RTS [Электронный ресурс]: Информационный портал DTF.RU – Режим доступа: <http://dtf.ru/articles/read.php?id=46788> (дата обращения: 18.07.2016)

44. Порцевский, А.К. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива: Учебное пособие. / Порцевский А.К., Катков Г.А. - М.: МГОУ, 2004. - 120 с.

45. Орехов, В.Г. Механика разрушений инженерных сооружений и горных массивов / В.Г. Орехов, М.Г. Зерцалов - М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2016.— 305 с .

46. Горное давление [Электронный ресурс] // Электронная горная энциклопедия: [сайт]. URL: <http://www.mining-enc.ru/g/gornoe-davlenie/> (дата обращения: 18.07.2016)

47. Лукьянов, В.Г. Технология проведения горно-разведочных выработок / В.Г. Лукьянов, А.В. Панкратов, В.А. Шмурыгин - М.: Юрайт, 2016 - 795 с.

48. Варданян, Г.С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков - М.: ИНФРА-М, 2016 - 638с.

49. Галин, Г.Я. Механика сплошных сред в задачах / Г.Я. Галин [и др.] - М.: Ленанд, 2017 - 640 с.

50. Пановко, Я.Г. Механика деформируемого твердого тела. Современные концепции, ошибки и парадоксы / Я.Г. Пановко - М.: Ленанд, 2017 - 288 с.

51. Суржик, И.Н. Метод конечных элементов в решении задач механики несущих систем / И.Н. Суржик - М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2015 - 200 с.

52. Трушин, С.И. Строительная механика. Метод конечных элементов / С.И. Трушин - М.: Инфра-М, 2016 - 308 с.

53. Сидоров, В.Н. Метод конечных элементов в расчете сооружений / В.Н. Сидоров, В.В. Вершинин - М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2015 — 380 с.

54. Свидетельство № 2010611370 Российская Федерация. Композит–НК : [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ] /В. О. Каледин [и др.] зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 17.02.2010. –1 с.

55. Степанов, Ю. А. Методика построения компьютерной трехмерной модели шахты [Текст] / Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин // Вестник компьютерных информационных технологий. — 2015.— № 19. - С. 25-31.

56. Кудрявцев, Ю.А. OLAP-технологии: обзор решаемых задач и исследований // Бизнес-информатика. 2008. №1 С.66-70

57. Burke, Steve What is the "Texture Fill-Rate" on a GPU and Does it Matter? [Электронный ресурс] // Gamers Nexus - Режим доступа: [сайт]. URL: <http://www.gamersnexus.net/guides/1747-what-is-texture-fill-rate-defined> (дата обращения 18.07.2016)

58. Документация Unity3D [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.unity3d.com> - (дата обращения 18.07.2016)

59. Шаллоуей А. Шаблоны проектирования. Новый подход к объектно-ориентированному анализу и проектированию / Алан Шаллоуей, Джеймс Р. Тротт — М.: «Вильямс», 2002. —288с.

60. Степанов, Ю.А. Способ оптимизации ресурсов для визуализации объектов горного предприятия. / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Материалы III международной научно-практической конференции "Академическая наука - проблемы и достижения". - Москва: CreateSpace, 2014г. – С.174-177.

61. Амосин, Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной механики / Б.З Амосин, А.Б. Фадеев – М.: Недра, 1975.

62. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б Фадеев - М.: Недра, 1987.

63. Степанов Ю.А., Степанов И.Ю. Компьютерное моделирование геомеханических процессов при ведении очистных работ // Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. ст. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Новокузнец. ин-т (фил.) Кемеров. гос. ун-та.– Новокузнецк, 2014. – 239 с.

64. Бурмин Л.Н. Обзор существующих средств визуализации результатов исследования // Информатика: проблемы, методология, технологии:

материалы XIV Международной научно-практической конференции. - Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2014. - С. 96-99.

65. Тикунов, В.С. Анамарфозы. Что это такое? / В.С. Тикунов, С.М. Гусейн-Заде, – 2 изд. – М.: ЛКИ, 2012. – 168 с.

66. Королев А.А. Компьютерное моделирование. /А.А Королев – М.:Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 232 с.

67. Степанов Ю.А. Метод визуализации результатов моделирования состояния углепородного массива / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Перспективы развития информационных технологий: Труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Кемерово, 29-30 мая 2014 г. – Кемерово, 2014. – с.366-367

68. Анциферов А. В., Глухов А. А., Омельченко А. А. Географические информационные системы (ГИС) в автоматизации технологических процессов в горной промышленности // ГИАБ. 2001. №3 С.101-103.

69. Cairo, Alberto. The Functional Art. An introduction to information graphics and visualization / Alberto Cairo - CA:New Riders, 2013 – 384p.

70. Ахо, Альфред В. Структуры данных и алгоритмы / Джон Э. Хопкрофт, Джеффри Д. Ульман - М.:Издательский дом "Вильямс", 2016. - 400 с.

71. Степанов Ю.А. Обеспечение информационной поддержки ведения горных работ с использованием ГИС-технологий / Ю.А. Степанов // Вестник КузГТУ. - 2014. - №4. - С. 118-122.

72. Дейт, К.Дж. Введение в системы баз данных / К.Дж. Дейт - 8 изд. - М.:Издательский дом "Вильямс", 2005. - 1328 с.

73. Шаши Ш. Основы пространственных баз данных. / Чаула Санжей, Шекхар Шаши. - М.: Кудиц-образ, 2004. - 336 с

74. Федоров, А. Введение в OLAP-технологии Microsoft / А. Федоров, Н.С. Елманова. - М.: Диалог-МИФИ, 2002.- 272 с.

75. Степанов, Ю.А. Структура региональной геоинформационной системы при ведении выемочных работ угледобывающих предприятий / Ю.А. Степанов // Геоинформатика. – 2012. – №1. – С.36-41.

76. Corti, P. PostGIS Cookbook / Paolo Corti, Thomas J. Kraft, Stephen Vincent Mather, Bborie Park. - Birmingham : Packt Publishing, 2014. - 484 p.

77. Степанов, Ю.А. Об одном из способов хранения и анализа пространственно-атрибутивных данных угледобывающего предприятия /Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Журнал «Информация и Космос».— 2015.— № 4. - С.113-117.

78. Бурмин, Л.Н. Графическое представление результатов моделирования зон разрушения горных пород // Новая наука: опыт, традиции, инновации: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (24 октября 2015г, г. Стерлитамак), в 2 ч. Ч.2 - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – С.114-116.

79. Lipschutz, Seymour. Schaum's Outline of Theory and Problems of Essential Computer Mathematics. New York: McGraw-Hill - 1982. - p. 3

80. Демидова Н.В. Метрология, стандартизация и сертификация / Н.В. Демидова М.: ЭКСМО, 2007. - 34 с.

81. Леонтовский П. Маркшейдерские задачи. Часть 5: Элементы залегания пластов (Горная геометрия) / П. Леонтовский — Издательство: Тип. Губерн. земства., 1905 — 258 с.

82. Байков В.А. Математическая геология. Том 1. Введение в геостатистику / В.А. Байков, Н.К. Бакиров, А.А. Яковлев - М.: Институт компьютерных исследований, 2012 - 228с.

83. Бурмин, Л.Н., Степанов, Ю.А. Разработка информационной системы для моделирования динамических процессов обрушения породы при проведении подземных работ // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей Семнадцатой международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". - СПб.: Изда-во Политехн. ун-та, 2013. – С.26-39

84. Comparison of relational database management systems [Электронный ресурс] URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_relational\\_database\\_management\\_systems](http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_relational_database_management_systems) (дата обращения: 21.04.2015).

85. Степанов, Ю.А. Влияние секции механизированной крепи на геомеханические процессы в окрестности очистного забоя / Ю.А. Степанов, А.В. Степанов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2006. – №6. – С. 35-36.

86. Ткаченко В.Ф., Добровольский А.Н., Крячко А.П. ГИС-технологии в автоматизации производственных процессов горнорудного предприятия. // Сборник научных трудов НГА Украины №7, Т.1 Маркшейдерия и геодезия. Разработка месторождений полезных ископаемых. Геоинформационные технологии в горном деле и геологии. - Днепропетровск: РИК НГА Украины 1999. - с. 70 - 74.

87. Мотылев И.В. Применение теории графов для конструирования ГИС в горном деле. // Проблемы и перспективы использования геоинформационных технологий в горном деле. Доклады II Международной научно-практической конференции. 15-17 мая 2000 г. - Днепропетровск:РИК НГА Украины, 2000. - с. 65 -72.

88. Степанов, Ю.А. Об одном из способов визуализации исходных данных для подготовки анализа углепородного массива (статья) / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Materiály X mezinárodní vědecko - praktická conference «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2014». - Díl 30. Moderní informační technologie.: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 47-51 stran.

89. Степанов, Ю.А. Об одном из способов визуализации геопространственных данных /Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Э65. Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды международной научно-практической конференции - Кемерово: Сибирское отделение Российской академии наук. Кемеровский научный центр СО РАН, Институт угля СО РАН. Институт углехимии и химического материаловедения СО РАН. Кузбасский государственный

технический университет, Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР», ООО «Кузбасская выставочная компания «Экспо-Сибирь» 2013 – С. 133-135.

90. Степанов, Ю.А. Программа для мониторинга технологических процессов гидродобычи угля / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Современные концепции научных исследований: Ежемесячный научный журнал №7 / 2014. - М.:Евразийский Союз Ученых, 2014 - С.142-144

91. Степанов, Ю.А. Информационная система визуальной подготовки исходных данных для программного комплекса «Композит-НК» / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Краевые задач и математическое моделирование: темат.сб.нач.ст. / под общей редакцией Е.А. Вячкиной, В.О. Каледина; М-во образования и науки Рос.Фдереации, Новокузнец. Ин-т (фил.) Кемеров. Гос. Ун-та. – Новокузнецк, 2014. – с 28-32.

92. Степанов, Ю.А Компьютерная реализация определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистного забоя / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Краевые задач и математическое моделирование: темат.сб.нач.ст. / под общей редакцией Е.А. Вячкиной, В.О. Каледина; М-во образования и науки Рос.Фдереации, Новокузнец. Ин-т (фил.) Кемеров. Гос. Ун-та. – Новокузнецк, 2014. – с.271-278

93. Степанов, Ю.А. Специализированная ГИС для моделирования процессов горного предприятия / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Журнал «Геоинформатика» / ФГУП ГИЦ РФ «ВНИИгеосистем». – Москва, 2015. – с. 3-6

94. Бурмин, Л.Н. Анализ информационных технологий и систем для безопасности ведения горных работ / Л.Н. Бурмин, В.Ю. Барич-Бурмина // Современные концепции научных исследований: Ежемесячный научный журнал №10(19) / 2015. - М.:Евразийский Союз Ученых, 2015 - С.63-64

95. Бурмин, Л.Н. Технология построения компьютерного трехмерного изображения в качестве результата геометрического анализа / Л.Н. Бурмин, В.Ю. Барич-Бурмина // Природа и экономика Кемеровской области и спредельных территорий. Сборник научных статей под общей

редакцией В.А.Рябова; М-во образования и науки Рос.Федерации, Новокузнецк, ин-т (фил.) Кемеров.гос.ун-та. – Новокузнецк, 2015 – с.127-132.

96. Степанов, Ю.А. Анализ пространства при ведении подземных горных работ с использованием геоинформационных систем / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Природа и экономика Кемеровской области и спредельных территорий. Сборник научных статей под общей редакцией В.А.Рябова; М-во образования и науки Рос.Федерации, Новокузнецк, ин-т (фил.) Кемеров.гос.ун-та. – Новокузнецк, 2015 ISBN 978-5-8353-1476-8

97. Бурмин, Л.Н. Об усовершенствовании методов расчета напряженно-деформированного состояния угольного массива в ГИС / Л.Н. Бурмин, В.Ю. Барич-Бурмина // Природа и экономика Кемеровской области и спредельных территорий. Сборник научных статей под общей редакцией В.А.Рябова; М-во образования и науки Рос.Федерации, Новокузнецк, ин-т (фил.) Кемеров.гос.ун-та. – Новокузнецк, 2015 – с. 139-141.

98. Степанов Ю.А. Информационная система прогнозирования опасных зон повышенного горного давления в очистных забоях угольных шахт с использованием ГИС-технологий / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Журнал «Безопасность труда в промышленности».— 2015.— №12. - С. 50-53.

99. Степанов Ю.А. Моделирование маршрутов спасения работников при возникновении чрезвычайной геомеханической ситуации / Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // Журнал «Безопасность труда в промышленности».— 2016.— №8. - С. 26-33.

100. Коломейченко М. И., Чеповский А. М. Визуализация и анализ графов больших размеров // Бизнес-информатика. 2014. №4 (30) С.7-16.

101. Каппушева Т. Л., Кононова Н. В., Кочкаров Р. А. Плоскостная укладка и алгоритмы визуализации фрактальных графов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2006. №3 С.305-312.

102. Инструкция по составлению планов ликвидации аварий на угольных шахтах. Утверждена приказом Ростехнадзора от 1 декабря 2011 г. N 681

103. Угольная база России. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский и Западно-Сибирский бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). М., ООО «Геоинформцентр», 2003.
104. Краткая характеристика ОСУ ОАО "Шахта "Алардинская" [Электронный ресурс] URL: <http://mirznanii.com/a/290769/kratkaya-kharakteristika-osu-oao-shakhta-alardinskayas> (дата обращения 18.07.2016)
105. Геологический отчет. "Участок "Алардинский Восточный 2" Алардинского каменноугольного месторождения Кузбасса. (Геологическое строение, качество и подсчет запасов угля по состоянию на 01.01.2013г." [Электронный ресурс] URL: <http://www.rfgf.ru/catalog/docview.php?did=4a71962347f50b4bbe994dcf11f24255> (дата обращения 18.07.2016)