

На правах рукописи



**Бурмин Леонид Николаевич**

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

Специальность 25.00.35 - Геоинформатика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург - 2017

Работа выполнена в Новокузнецком институте (филиале) ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Новокузнецк.

Научный руководитель: **Степанов Юрий Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент каф. Информатики  
и вычислительной техники, ФГБОУ ВО НИФ КемГУ

Официальные оппоненты: **Финкельштейн Михаил Янкелевич**,  
доктор технических наук, зав. отдела программного  
обеспечения комплексной обработки геолого-геофизической информации отделения "ВНИИгеосистем"  
ФГБУ "ВНИГНИ";

**Лалин Сергей Эдуардович**,  
кандидат технических наук, научный сотрудник ка-  
федры Автоматики и компьютерных технологий  
ФГБОУ ВО УГГУ;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (г. Кемерово)

Защита состоится 21 июня 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 004.010.02 при Институте горного дела УрО РАН по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института горного дела УрО РАН

Автореферат диссертации разослан «17» мая 2017 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

кандидат технических наук



Панжин Андрей Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Угольная промышленность является важной отраслью топливно-энергетического комплекса Российской Федерации: из российских угольных месторождений добывается более 330 млн тонн угля ежегодно. 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, планируемыми 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. 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. 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, уровень напряжения в кровле горных пород и т.п. 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 актуальности 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: «Галнах-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: «Vědaatechnologie: krokdobudoucnosti – 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 опубликовано 18 печатных 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируется цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, излагается краткое содержание диссертации.

**В первой главе** проведен анализ существующих геоинформационных систем, использующих системы контроля состояния горного массива угольных шахт. На этапе проектирования шахты разрабатываются маршруты передвижения горнорабочих для эвакуации в случае возникновения опасных производственной ситуации. Эти маршруты используются для составления позиций плана ликвидации аварий. Однако в связи с тем, что в случае возникновения аварии, передвижение по указанным в плане горным выработкам может быть ограничено или невозможно, возникает необходимость в определении альтернативных вариантов маршрутов эвакуации. Для выбора оптимального маршрута из числа возможных, целесообразно проводить геомоделирование передвижения горнорабочих по выработкам с возможностью изменения условий передвижения.

Существующие информационные системы, применяющиеся для решения вопросов безопасности («Талнах-координата», «Геодинамический полигон» «Underground Positioning System) не приспособлены в достаточной мере для выбора и обоснования уровня безопасности маршрута эвакуации, и не позволяют моделировать ситуации, ограничивающие возможность передвижения по маршруту для оценки безопасности альтернативного пути эвакуации.

В результате проведенного анализа было выявлено, что существует необходимость в разработке комплекса программ для выбора оптимального маршрута на основе данных об углепородном массиве, топологии горных выработок и индивидуальных физических данных горнорабочих. Для проведения многократных экспериментов и анализа полученных результатов возникает необходимость в использовании временного хранилища данных, содержащего входные и результирующие сведения. Для представления результатов моделирования в удобной для восприятия форме, целесообразно применение средств построения трехмерных компьютерных изображений.

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

Вопросы эффективного управления аварийно-спасательными работами в условиях ведения горных работ исследовались Белиным В.А., Калединой Н.О., Королевой В.Н., Кудряшевым В.В., Кутузовым Б.Н., Мутановым Г.М. и др.

В связи с этим, целесообразно создание инструмента для обеспечения минимизации последствий ЧС, основанного на методике анализа топологии горных выработок с целью определения маршрутов эвакуации для использования в позициях плана ликвидации аварий.

**Во второй главе** решена научная задача разработки геоинформационной модели выбора маршрутов эвакуации на основе существующей топологии горных выработок с использованием временных баз данных для внесения их в план ликвидации аварии. Описывается модель системы горных выработок в углепородном массиве, позволяющей определить маршрут эвакуации персонала с учетом пространственного положение опасных зон. Приведен алгоритм нахождения опасных зон в горном массиве с помощью технологии OLAP на основе сведений о напряженно-деформированном состоянии углепородного массива.

В геоинформационной модели выбора безопасного варианта маршрута эвакуации (рис.1) в качестве входных параметров учитываются: деформационные свойства пород, критерий прочности породы, топология горных выработок, минутный объем вентиляции легких горнорабочих, позиционирование горнорабочих.

В качестве ограничений выступают следующие условия:

- координаты маршрута должны находиться за пределами координат границы зоны предельного напряжения;
- время эвакуации не должно превышать время расхода самоспасателя;
- передвижение по горным выработкам должно соответствовать приемлемому уровню риска в отношении содержания метана, вредных газов и аэроклиматических условий.

В результате моделирования процесса эвакуации определяется и обосновывается безопасный маршрут выхода на поверхность.

Для нахождения областей предельного напряжения требуется построить атрибутивно-пространственную модель углепородного массива, ослабленного горными выработками.

Построение происходит в три последовательных этапа:

1. Структуризация сведений о геологоразведочных скважинах.
2. Пространственная интерполяция геологоразведочных данных.
3. Представление горных выработок в виде неориентированного графа.

На первом этапе данные геологической разведки необходимо структурировать с помощью табличного процессора в формат csv-файла, который затем экспортируется в базу данных.

Первичная обработка данных представляет собой продолжительную и трудоемкую работу, однако каждое последующее добавление и изменение данных осуществляются при помощи разработанной специализированной СУБД, что существенно упрощает работу за счет проверки корректности внесенных сведений.



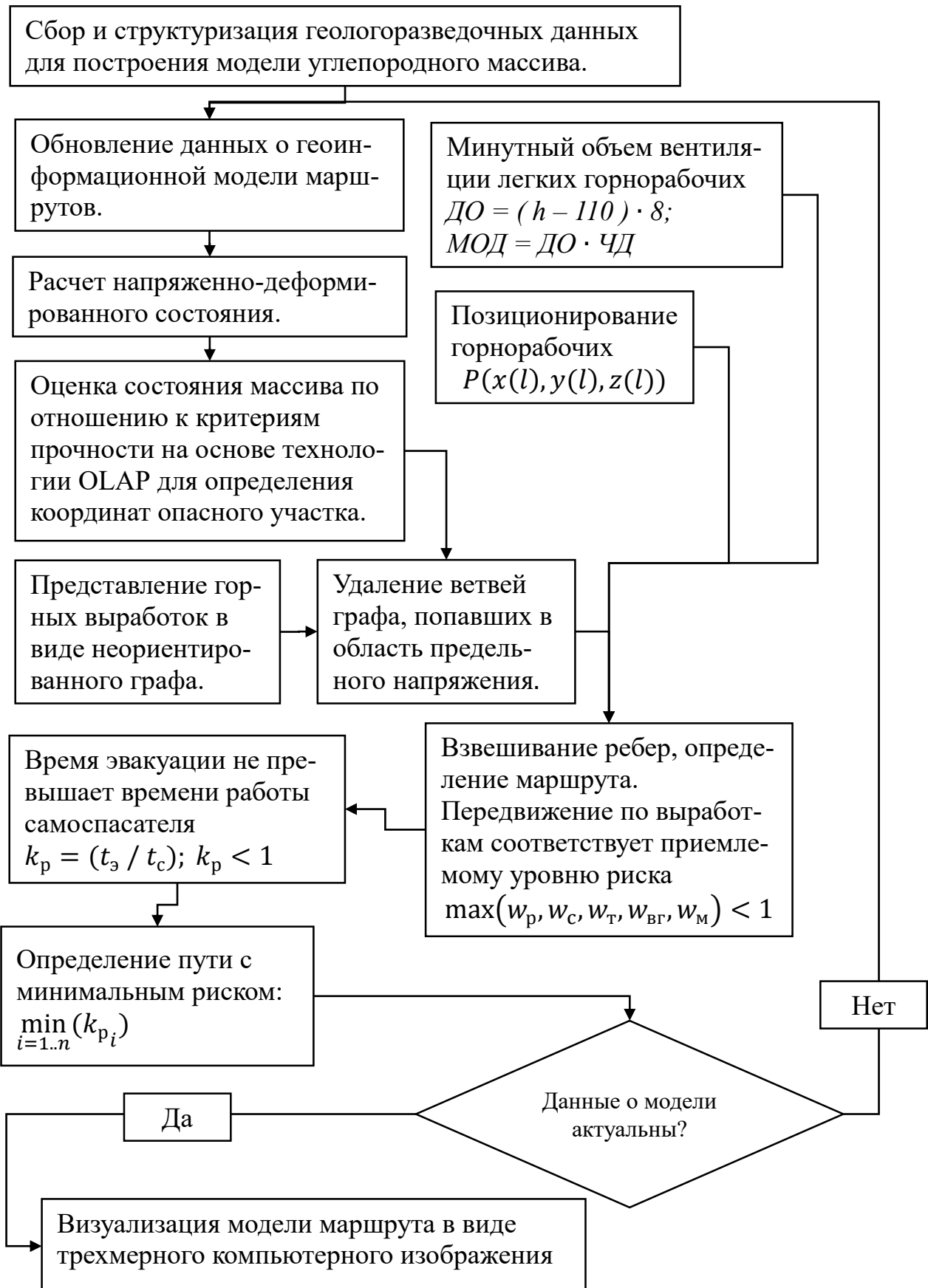


Рисунок 1 - Структурная схема формирования маршрута эвакуации

Также, существует возможность экспорта данных из горных геоинформационных систем Vulcan, Surpac и Micromine через выгрузку CSV-файла.

После экспорта структурированных сведений, база данных геологоразведочных скважин объединяется с базой данных деформационных свойств горных пород и базой данных, содержащих сведения о горнорабочих, во временное хранилище данных (рис.2).

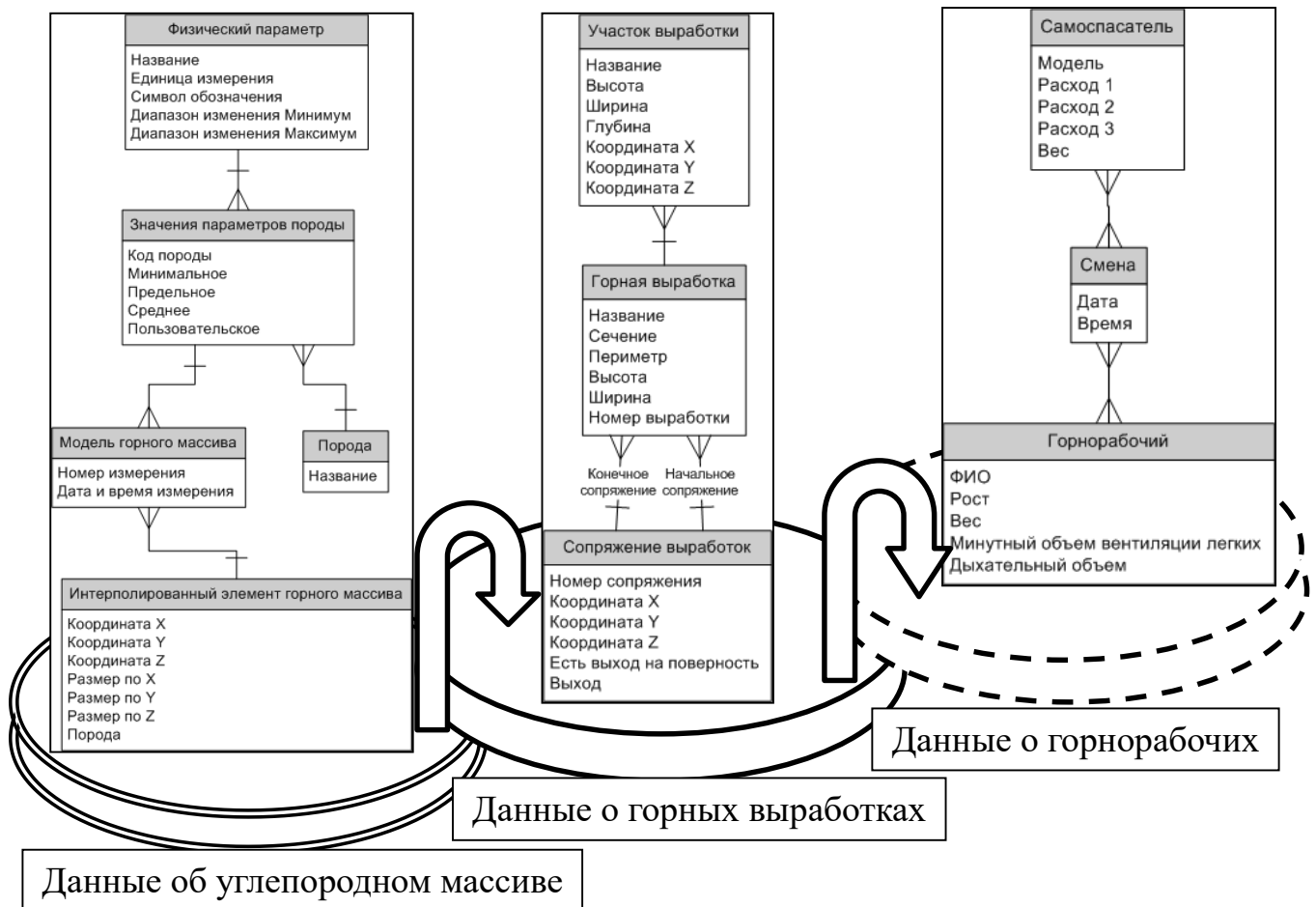


Рисунок 2 - Витрина хранилища данных об угольной шахте

Временной характер хранилища данных (рис.3) 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.

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.

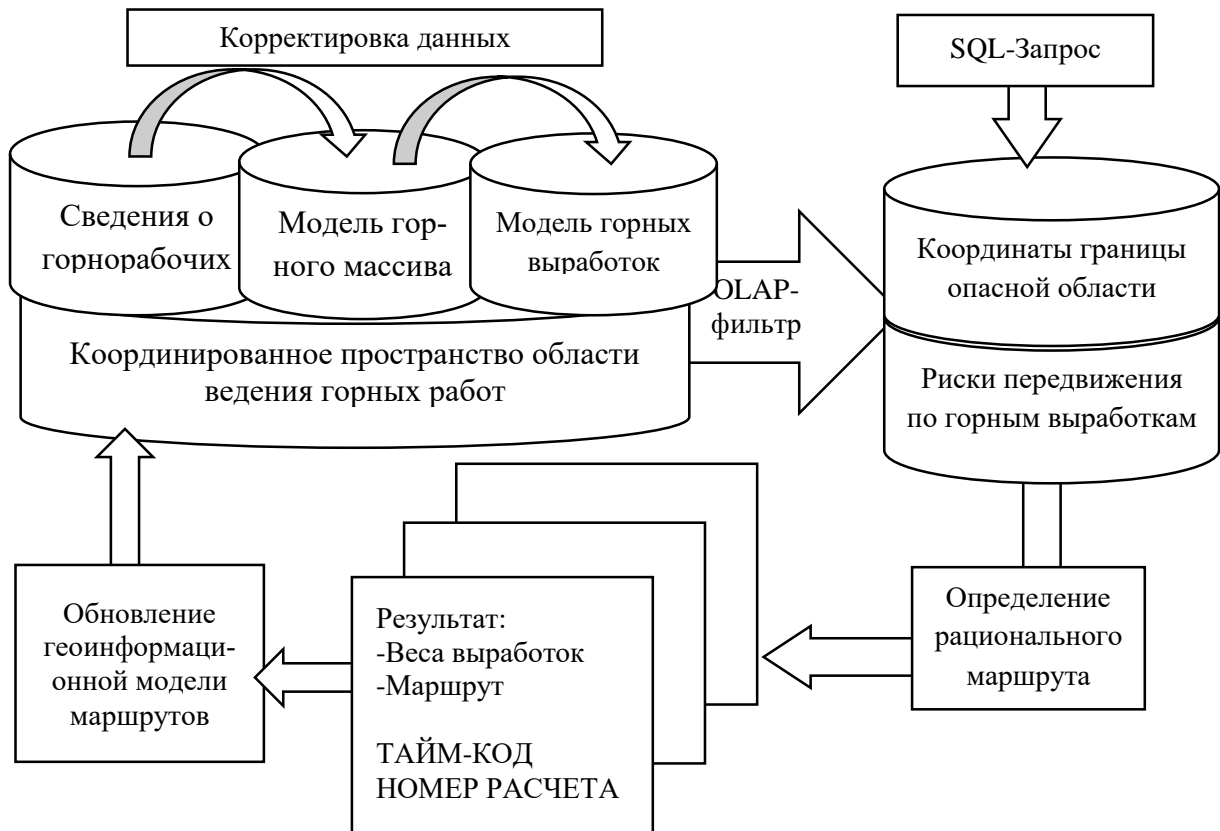


Рисунок 3 – Модель временного хранилища данных маршрутов эвакуации

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. Хранилище данных, благодаря реализованной технологии HOLAP, обеспечит 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 этап интерполяции - формирование модели углепородного массива, ослабленного горными выработками (рис.4). В случае, если данные были получены из внешней горной геоинформационной системы этап интерполяции не требуется, так как импортированные данные уже содержат сведения об углепородном массиве.

На третьем этапе данные о горных выработках структурируются и преобразуются в вид неориентированного взвешенного графа. Для удобства работы с графом целесообразно провести процедуру визуализации при помощи алгоритма разворачивания графа. В процессе отработки угольного пласта топология шахты изменяется, в связи с чем, необходимо периодически актуализировать данные

посредством обновления сведений о расположении пикетов в горных выработках. После построения геометрической модели горных выработок осуществляется анализ напряженно-деформированного состояния угленосного массива с помощью программного комплекса «Композит-НК». В результате расчета формируются данные о напряжении и смещении, которые используются на следующем этапе – нахождении областей предельного напряжения.

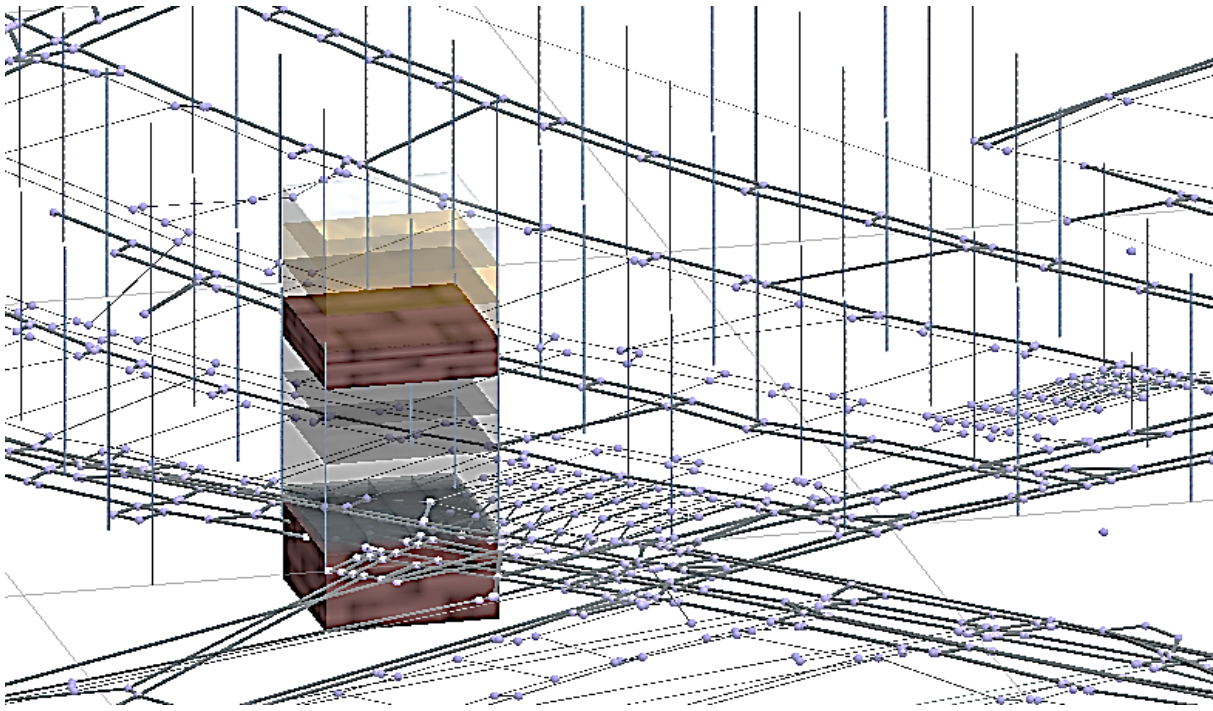


Рисунок 4 – Модель породного массива, ослабленного горными выработками.

Алгоритм нахождения областей использует OLAP-технологии поиска данных и состоит из нескольких шагов:

- 1) установка для горной породы функции принадлежности;
- 2) установка минимального индекса соответствия;
- 3) преобразование сведений в SQL для составления запроса;
- 4) расчет индекса соответствия для каждой строки результата;
- 5) группировка данных по пространственному расположению.

В результате работы последнего этапа формируется набор сведений, который будет описывать актуальное состояние области опасного напряжения для крайнего обновленного состояния геоинформационной модели. Область опасного напряжения совмещается с моделью горных выработок посредством сопоставления пространственных данных агрегата с пространственными данными, описывающими расположение горных выработок. Таким образом, для горных выработок формируется дополнительный слой атрибутивных данных, содержащий сведения о безопасности передвижения по каждой выработке в соответствии с актуальной геомеханической ситуацией.

Таким образом, обосновано следующее научное положение: 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.

**В третьей главе** разработано математическое обеспечение для решения задачи дискретной оптимизации, позволяющее обосновать безопасность выбранного маршрута посредством анализа пространственного расположения горных выработок и очагов ЧС, физических данных персонала и ресурса индивидуальных средств защиты.

Для построения геометрической модели горных выработок необходимо на каждом ребре ввести метрику, посредством описания каждого ребра графа через топологическую переменную в собственной оси координат:

$$dS = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \cdot dl, \quad (1)$$

где  $S$  – путевая координата, отображающая расстояние в метрах от начала выработки,

$l$  – топологическая, переменная, принимающая значение от 0 до 1 в зависимости от расстояния между точкой на ребре графа и координатой начала ребра графа.

Интегрирование по  $dl$  позволит вычислить расстояние от начала или от конца выработки до каждой из промежуточных точек на каждом ребре графа. Такое отображение позволяет вычислять положение горнорабочего относительно геометрической модели горных выработок.

Зависимость между каждой координатой и топологической моделью устанавливается посредством математического консонанса – функции принадлежности:

$$x(l) = (B_x - A_x) \cdot l + A_x, \quad (2)$$

где  $A_x$  – координата  $x$  начала выработки,

$B_x$  – координата  $x$  конца выработки.

Аналогичные зависимости устанавливаются для  $y(l)$ ,  $z(l)$

Такое отображение связывает пространственные географические координаты с топологическими координатами на двухмерном графе, что позволяет перенести данные об опасных зонах с трёхмерной модели на двухмерную.

Нахождение опасной выработки в опасной зоне вычисляется по формуле:

$$D(x, y, z) = 1 - \frac{\sigma_1(x, y, z)}{\sigma_p(x, y, z)}. \quad (3)$$

Значение  $D(x, y, z) < 0$  говорит о нахождении точки ребра графа в области предельного разрушения, с связи с чем необходимо не рассматривать это ребро при определении безопасного маршрута выхода на поверхность (рис.5).

Одного значения длины выработки недостаточно для оценки безопасности её прохождения, в связи с чем предложен способ вычисления веса ребра графа, основанный, помимо расстояния, на показателях, характеризующих уровень безопасности пребывания в выработке: аэрогазовые и климатические характеристики.

Вес относительной длины выработки представляет собой отношение длины каждой горной выработки к наиболее протяженной:

$$w_{p_i}(s_i) = \frac{s_i}{\max_{k=1..n}(s_k)}. \quad (4)$$

Вес скорости движения воздуха в горных выработках вычисляется посредством функции принадлежности и лежит в диапазоне допустимой скорости движения воздуха, который, после нормализации, позволяет получить значение в диапазоне [0;1]. Вес для концентрации вредных газов, метана и температуры вычисляется подобным образом.

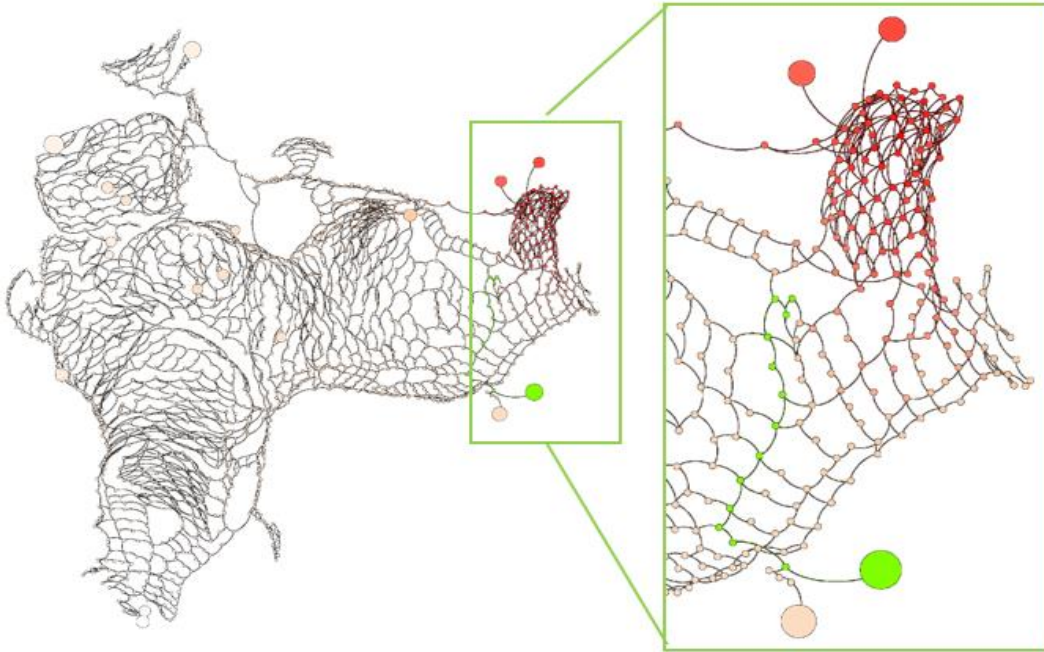


Рисунок 5 - Отображение опасных областей на графе горных выработок

$$w_{c_i}(V_i) = \begin{cases} \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}, & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ 1, & V_i > V_{\max} \\ 0, & V_i < V_{\min} \end{cases}. \quad (5)$$

Вес концентрации вредных газов (КВМ) в воздухе.

$$w_{вг_i}(КВГ_i) = \begin{cases} \frac{КВГ_i - КВГ_{\min}}{КВГ_{\max} - КВГ_{\min}}, & КВГ_{\min} \leq КВГ_i \leq КВГ_{\max} \\ 1, & КВГ_i > КВГ_{\max} \\ 0, & КВГ_i < КВГ_{\min} \end{cases}. \quad (6)$$

Вес концентрации метана (КМ) в воздухе.

$$w_{м_i}(КМ_i) = \begin{cases} \frac{КМ_i - КМ_{\min}}{КМ_{\max} - КМ_{\min}}, & КМ_{\min} \leq КМ_i \leq КМ_{\max} \\ 1, & КМ_i > КМ_{\max} \\ 0, & КМ_i < КМ_{\min} \end{cases}. \quad (7)$$

Вес температуры воздуха (Т) в выработке на основании данных о влажности и текущей скорости движения воздуха [2].

$$w_{T_i}(T_i) = \begin{cases} \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, & T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ 1, & T_i > T_{\max} \\ 0, & T_i < T_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

Помимо этого, температура воздуха соотносится с температурой взрыва газов. В случае приближения значения температуры к критическому, выработка помечается как опасная и исключается из топологии графа.

Агрегированный вес вычисляется как максимум из всех весов:

$$w_i = \max(w_{p_i}, w_{c_i}, w_{T_i}, w_{вг_i}, w_{m_i}). \quad (9)$$

Полученный вес характеризует степень опасности перемещения по горной выработке. Чем ближе значение веса к нулю, тем безопаснее выработка. Ребра, превышающие значение единицы, отбрасываются, что позволяет уменьшить граф и, как следствие, уменьшить время расчета. Допускается установка индекса соответствия для каждого веса, что позволяет увеличить требования к уровню безопасности по одному из параметров и дополнительно уменьшить количество анализируемых ребер графа.

После взвешивания ветвей графа, он анализируется с помощью алгоритма Дейкстры, в результате чего определяются возможные маршруты выхода на поверхность, согласно весовым значениям графа. Предоставляется возможность указать несколько «начальных точек» для заблаговременного сохранения маршрутов на случай возникновения различных нештатных ситуаций.

Для оценки риска передвижения по маршруту ( $k_6$ ) применяется способ расчета, основанный на вычислении отношения времени, необходимого горнорабочему для передвижения по маршруту ( $t_3$ ) ко времени, на которое рассчитаны индивидуальные средства защиты ( $t_{сз}$ ).

$$k_6 = \frac{t_3}{t_{сз}}. \quad (10)$$

На первом этапе рассчитывается время выхода на поверхность – для этого суммируются все временные диапазоны, затраченные на переход по каждой горной выработке. Причем время считается как отношение пути к скорости, заданной в соответствии с «Инструкцией по составлению планов ликвидации аварий на угольных шахтах»:

$$t_3 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_i}{v_i \cdot (1 - w_i)} \right), \quad (11)$$

где  $s_i$  – расстояние каждой выработки в маршруте, м.,  
 $v_i$  – скорость передвижения по выработке, м/с,  
 $w_i$  – вес выработки.

Затем необходимо рассчитать время ресурса самоспасателя. Оно зависит от модели самоспасателя и вентиляции легких горнорабочего. Предварительно рассчитывается дыхательный объем легких (ДО):

$$ДО = (h - 110) \cdot 8, \quad (12)$$

где  $h$  – рост горнорабочего, см.

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

$$МОД = ДО \cdot ЧД, \quad (13)$$

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

На основании этой характеристики предлагается формула оценки ресурса самоспасателя на основе функции принадлежности:

$$t_{сз}(МОД) = \begin{cases} t_{п}, МОД \leq МОД_{п} \\ t_{п} - (t_{п} - t_{с}) \cdot \left(\frac{МОД - МОД_{п}}{МОД_{с} - МОД_{п}}\right), МОД_{п} < МОД < МОД_{с} \\ t_{с}, МОД = МОД_{с} \\ t_{с} - (t_{с} - t_{т}) \cdot \left(\frac{МОД - МОД_{с}}{МОД_{т} - МОД_{с}}\right), МОД_{с} < МОД < МОД_{т} \\ t_{т}, МОД \geq МОД_{т} \end{cases}, (14)$$

где  $МОД_{п}$  – лёгочная вентиляция в состоянии покоя,

$t_{п}$  – время работы самоспасателя, рассчитанное на  $МОД_{п}$ ,

$МОД_{с}$  – лёгочная вентиляция во время нагрузок средней тяжести,

$t_{с}$  – время работы самоспасателя, рассчитанное на  $МОД_{с}$ ,

$t_{т}$  – время работы самоспасателя, рассчитанное на  $МОД_{с}$ .

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

Получаемый в результате коэффициент интерпретируется следующим образом: если значение коэффициента меньше единицы, то у сотрудника есть запас времени для прохождения по маршруту. Если коэффициент больше единицы, то это говорит о нехватке времени для выхода на поверхность. В этом случае, программа пытается найти маршрут, включающий в себя прохождение через камеры аварийного воздухообеспечения для получения дополнительного ресурса самоспасателя, либо для пережидания аварии. Соответственно, наиболее безопасным будет являться маршрут с минимальным значением коэффициента.

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 маршрутов передвижения 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 географическими, 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.

**В четвертой главе** решена научная задача разработки программного обеспечения для проведения геомоделирования маршрутов эвакуации горнорабочих для предоставления информационной поддержки при составлении позиций плана ликвидации аварии.

Описывается архитектура приложения, классы программ, реализующие поисковые методы. Комплекс программ использует сведения, размещенные в хранилище данных, однако большинство времени работает лишь с некоторыми его таблицам, что позволяет провести кеширование данных и увеличить скорость работы за счет снижения времени получения данных.

Для реализации этой задачи было создано несколько классов (рис. 6).

1. Класс «Узел». Помимо пространственных характеристик, считанных из CSV-файла добавляется несколько новых атрибутов, описывающих значение веса ветвей от начала движения: номер узла, предшествующий текущему для восстановления маршрута движения и метку, сообщающую о том, что узел уже использовался для расчета.

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

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

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

Отличительной особенностью программного комплекса является разграничение структур данных для нахождения маршрута от структур данных для визуализации. Такой подход позволяет предоставить программный интерфейс для комплексирования разработанного программного комплекса с уже внедренными на угольном предприятии информационными системами. Открытая архитектура программного комплекса позволяет оптимизировать процесс внедрения программного комплекса за счет возможности импорта данных из внешних источников данных.

В разработанном полноэкранный приложении реализован трехмерный интерфейс, позволяющий визуализировать компьютерную модель в виде трехмерного компьютерного изображения (рис.7).

Благодаря разработанному интерфейсу, пользователь может беспрепятственно перемещаться по всей трехмерной модели выработок и моделировать перемещением людей по горным выработкам.

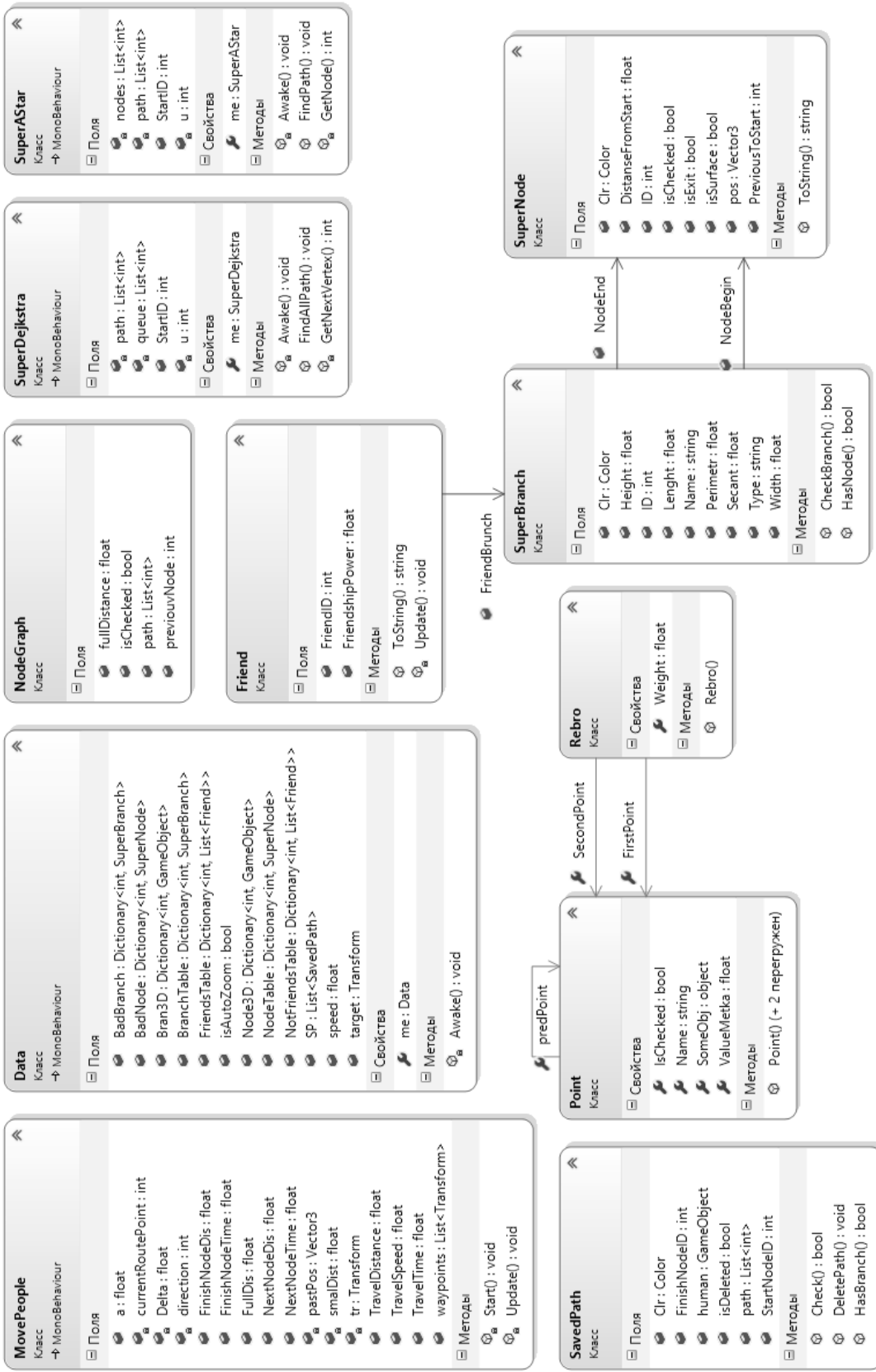


Рисунок 6 - Диаграмма классов программного обеспечения для проведения геомоделирования маршрутов эвакуации горнорабочих

Перед началом работы алгоритма граф оптимизируется следующим образом: из контейнера, содержащего узлы, вырезаются «тупиковые» и перемещаются в отдельный контейнер. После этого осуществляется поиск ветвей, принадлежащих «тупиковым» узлам – они также переходят в отдельный контейнер.

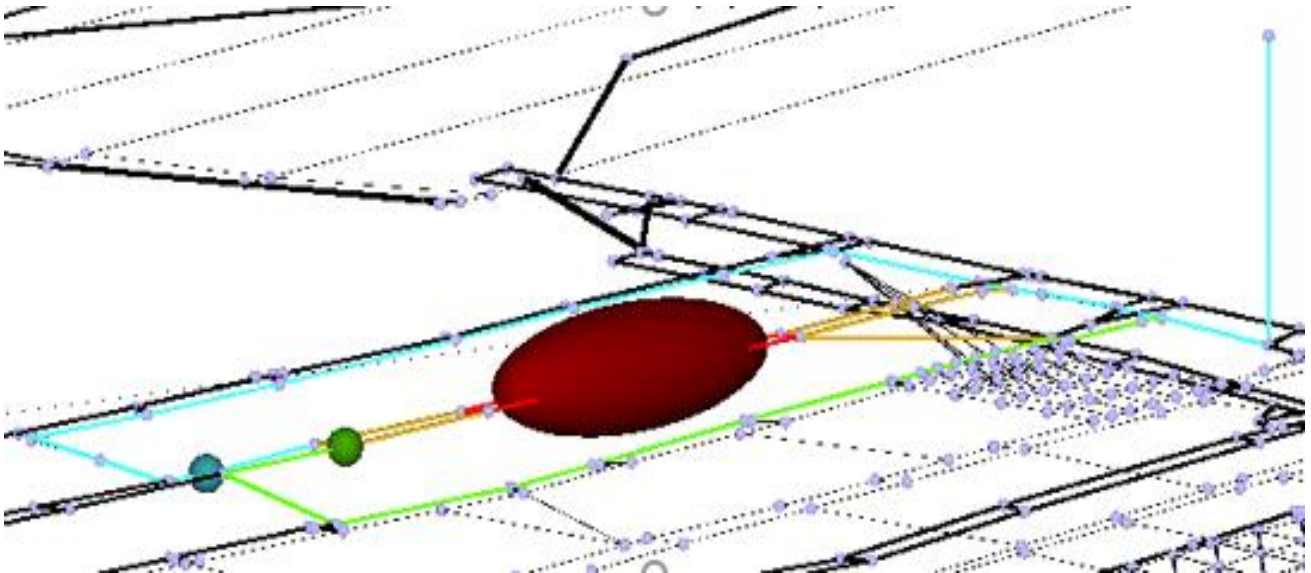


Рисунок 7 – Визуализация модели в виде трехмерного изображения

Это позволяет уменьшить время работы алгоритма за счет удаления изначально тупиковых маршрутов, что является попыткой смягчить возможную вырожденность графа.

В случае блокировки какой-либо выработки, диспетчер отмечает её на трехмерной модели и путь автоматически пересчитывается для всех маршрутов, включавших в себя этот участок пути. Таким образом, обосновано следующее научное положение: 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

## ВЫВОДЫ И 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 результаты диссертационной работы:

1. Разработана геоинформационная модель выбора маршрута эвакуации на основе периодически обновляемых пространственно-определенных данных о

напряженно-деформированном состоянии углепородного 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.

## **ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Специализированная ГИС для моделирования процессов горного предприятия / Журнал «Геоинформатика» / ФГУП ГИЦ РФ «ВНИИгеосистем». – Москва, 2015. – №1. – С.3-6.

2. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Методика построения компьютерной трехмерной модели шахты /DOI: 10.14489/vkit.2015.09. pp.025-031 Научно-технический и производственный журнал «Вестник компьютерных и информационных технологий» / ООО «Издательский дом «Спектр». – Москва, 2015 –С.25-31.

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

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

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

6. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Формирование пространственно-атрибутивных данных для объектов горнотехнических систем / Журнал «Геоинформатика» №1 / ФГУП ГИЦ РФ «ВНИИгеосистем». – Москва, 2016. – №4. – С.36-40.

### **Статьи в сборниках трудов научных конференций**

7. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Об одном из способов визуализации геопространственных данных. // 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, 2013 – С.133-135.

8. Бурмин Л.Н. Обзор существующих средств визуализации результатов исследования. // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Воронеж, 6-8 февраля 2014 г.: т.1. / Воронежский государственный университет. - Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2014 – С.96-99.

9. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Метод визуализации результатов моделирования состояния угленосного массива. // Перспективы развития информационных технологий: Труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Кемерово, 2014 г. – С.366-367.

10. 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 XVII международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". - СПб., Издательство Политехнического университета, 2013. -С.26-29.

11. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Об одном из способов визуализации исходных данных для подготовки анализа угленосного массива. // 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, 2014. – С.47-52.

12. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Способ оптимизации ресурсов для визуализации объектов горного предприятия. // Материалы III международной научно-практической конференции "Академическая наука - проблемы и достижения" 20-21 февраля 2014 г. Москва. ISBN: 978-1496060730. ББК 72, 2014 – С.174-176.

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

14. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Информационная система визуальной подготовки исходных данных для программного комплекса «Композит-НК» //

Краевые задач и математическое моделирование: тематический сборник научных статей / под общей редакцией Е.А. Вячкиной, В.О. Каледина; Министерство образования и науки РФ, НФИ КемГУ. – Новокузнецк, 2014. – С.28-32.

15. Бурмин Л.Н. Степанов Ю.А. Компьютерная реализация определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистного забоя // Краевые задач и математическое моделирование: тематический сборник научных статей / под общей редакцией Е.А. Вячкиной, В.О. Каледина; Министерство образования и науки РФ, НФИ КемГУ. – Новокузнецк, 2014. – С.271-278.

16. 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.

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

18. Бурмин Л.Н., Степанов Ю.А. Анализ пространства при ведении подземных горных работ с использованием геоинформационных систем // Природа и экономика Кемеровской области и сопредельных территорий. Сборник научных статей под общей редакцией В.А. Рябова; Министерство образования и науки РФ, НФИ КемГУ – Новокузнецк, 2015. – С.132-133.

### **Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ**

1. Свидетельство №2015618333. Российская федерация. Компьютерная программа построения блочной модели горного массива по геологоразведочным данным с применением геоинформационных технологий / Л.Н. Бурмин, Ю.А. Степанов, Р.С. Шипулин заявители и правообладатели Л.Н. Бурмин, Ю.А. Степанов, Р.С. Шипулин 2015г.

2. Свидетельство №2015618324. Российская федерация. Компьютерная программа для визуализации напряженно-деформированного состояния углепородного массива с применением геоинформационных технологий / Л.Н.Бурмин, Ю.А. Степанов; заявители и правообладатели Л.Н.Бурмин, Ю.А.Степанов 2015г.

3. Свидетельство №2015619497. Российская федерация. Компьютерная программа для визуализации напряженно-деформированного состояния углепородного массива посредством создания анаморфозной картографической анимации / В.А. Марченко, А.И. Битюков, Л.Н. Бурмин; заявители и правообладатели В.А. Марченко, А.И. Битюков, Л.Н. Бурмин. 2015г.