

На правах рукописи



**Степанов Юрий Александрович**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ  
УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА  
ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

Специальность

25.00.35 «Геоинформатика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Екатеринбург - 2016

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

Научный консультант	Шек Валерий Михайлович, доктор технических наук, профессор, каф. АСУ, НИТУ «МИСиС»
Официальные оппоненты	Финкельштейн Михаил Янкелевич, доктор технических наук, начальник группы программного обеспечения отдела информационных технологий Московского филиала ФГБУ "Росгеолфонд" "ВНИИгеосистем";
	Лалин Эдуард Самуилович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Автоматики и компьютерных технологий ФГБОУ ВО УГГУ;
	Домрачев Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры геотехнологии Института горного дела и геосистем ФГБОУ ВО СибГИУ
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева» (г. Кемерово)

Защита состоится 21 декабря 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 004.010.02 при Институте горного дела УрО РАН по адресу: 620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института горного дела УрО РАН

Автореферат диссертации разослан «17» ноября 2016 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

кандидат технических наук



Панжин Андрей Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Рыночные условия, складывающиеся в России, требуют перехода угольной промышленности на высокоинтенсивные технологии выемки угля, которые могут быть достигнуты за счет автоматизации производственных процессов угледобычи и увеличения производительности добычных участков. При этом одной из основных задач была и остается безаварийность и безопасность технологических процессов.

Использование высокоинтенсивных технологий выемки угля и существенное увеличение нагрузок на очистной забой требуют гибкого управления силовыми характеристиками механизированных крепей в соответствии с изменяющимися в пределах выемочных полей и блоков горно-геологическими и горнотехническими условиями, а также характером изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива в окрестности очистного забоя при его циклическом движении. Это позволяет, в свою очередь, оптимизировать энергетические затраты, снижать, во многих случаях, себестоимость добытого угля, продлевать срок службы механизированных крепей, предотвращать возможность возникновения чрезвычайных ситуаций. Уместно отметить, что, по данным УК «Кузнецкуголь», в 36% забоев работающие механизированные комплексы не соответствуют горно-геологическим условиям, что не могло не оказывать влияния на производительность и безопасность ведения очистных работ.

Одной из проблем, снижающих эффективность внедрения высокоинтенсивные технологии выемки угля, является отсутствие предварительного прогноза динамики обрушения горных пород при проектировании и эксплуатации горнотехнических комплексов, на основе использования современных информационных систем и технологий. В связи с тем, что протекание геомеханических процессов в углепородном массиве при ведении горных работ сопровождается горными ударами, выходом метана и другими нештатными ситуациями, для принятия проектных и технологических решений необходим системный подход к анализу взаимообусловленных разнородных факторов, влияющих на состояние углепородного массива, ослабленного сложными по геометрии и топологии выработками и испытывающего воздействие со стороны технологического оборудования. Такой анализ не представляется возможным без использования современных информационных технологий и компьютерного моделирования проектируемого горно-технического комплекса.

Вместе с тем, анализ существующих в горной отрасли информационных систем показал, что их проблемная ориентация определяется ограниченной номенклатурой решаемых задач: анализ, оценка, мониторинг, управление и планирование, поддержка принятия решений и т.п. Распространённые системы программного обеспечения для добывающих отраслей промышленности ориентированы в основном на оценку запасов и решение отдельных задач проектирования и планирования горных работ. В то же время практически не имеется эффективного программного обеспечения для решения таких задач, как обеспечение управления геомеханическими, газодинамическими и гидродинамиче-

скими процессами при выемке полезного ископаемого. До сих пор обрушения горных пород в процессе выемки угля занимают первенство по частоте аварий и несчастных случаев, что говорит о необходимости разработки новых подходов к проектированию информационных систем обеспечения геомеханической безопасности в очистных забоях. Для повышения устойчивости кровли необходимо проводить прогнозирование динамики перераспределения напряжений в массиве горных пород при ведении очистных работ и обоснование способа выемки угля, но эти задачи также пока не решены.

Таким образом, для проектирования устойчиво функционирующих высокопроизводительных предприятий по подземной разработке месторождений полезных ископаемых остаётся первостепенно актуальной проблема развития теоретических основ разработки геоинформационных систем, обеспечивающих компьютерное моделирование широкого класса физических и механических процессов разрушения горных пород при взаимодействии с угледобывающими механизированными комплексами, направленное на прогноз риска обрушения кровли выработок при ведении горных работ.

**Целью работы** является разработка информационно-аналитического обеспечения геоинформационных систем компьютерного моделирования динамики напряженно-деформированного состояния углепородного массива, обеспечивающего снижение риска аварийных ситуаций, вызванных недопустимо высокими напряжениями в горных породах при ведении очистных работ.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

1. на основе анализа ранее выполненных исследований разработать теоретические основы построения специализированных горных геоинформационных систем (ГГИС) поддержки принятия решений по снижению риска аварийных ситуаций, обусловленных геодинамическими процессами при ведении очистных работ в высокопроизводительных комплексно-механизированных забоях угольных шахт;
2. разработать методические основы создания специализированных программных средств электронного картографирования горно-геологического строения массивов горных пород угольных регионов, учитывающие прочностные свойства слагающих его пород;
3. разработать принципы исследования горнотехнических систем на основе геоинформационного моделирования процессов взаимодействия углепородного массива и технологического оборудования;
4. усовершенствовать метод расчета параметров нестационарного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя для различных режимов нагружения и разгрузки секций механизированной крепи при ведении очистных работ;
5. разработать алгоритм формирования компьютерных геоизображений новых видов, адекватно отображающих результаты моделирования динамики изменения параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива при циклическом воздействии на него секций механизированной крепи;

- б. исследовать эффективность применения информационно-аналитического и программного обеспечения компьютерного моделирования динамики разрушения углепородного массива с учетом положения секции механизированной крепи при паспортизации выемочных участков на угольных шахтах Кузбасса.

**Идея работы** состоит в системном подходе к компьютерному моделированию разрушения горных пород в процессе очистных работ с использованием электронного картографирования, с учетом фактических характеристик технологического оборудования и прогрессирующего снижения устойчивости пород кровли и вынимаемого угольного пласта.

**Методы исследований.** В процессе выполнения работы использовались:

- методы геоинформационного картографирования;
- методы статистической обработки и использования геопространственных данных с применением распределенных баз данных и знаний;
- методы математического и имитационного моделирования;
- метод объектно-ориентированного проектирования и программирования;
- методы идентификации математических моделей расчета НДС.

**Основные научные положения, защищаемые автором:**

1. создание информационно-аналитического обеспечения и методов системного проектирования горно-технологических систем возможно на основе компьютерного моделирования подземной части горного предприятия с использованием средств электронного трёхмерного картографирования горно-геологического строения углепородного массива, горных выработок и элементов технологических процессов;
2. для прогнозирования динамики НДС горного массива при отработке угольных пластов, требуется построение специализированной ГГИС на основе выявления функциональных единиц горнотехнических систем и их комплексирования в соответствующие модельные блоки, отличающиеся использованием функционально-объектного представления взаимодействующих объектов;
3. адаптивность компьютерных систем поддержки принятия решений к горно-геологическим условиям при проектировании и эксплуатации горнотехнических систем в специализированной ГГИС обеспечивается использованием объектно-ориентированного подхода от стадии построения математической модели до разработки приложений с модульной структурой и графическим интерфейсом;
4. достоверность результатов расчета параметров НДС углепородного массива в различных зонах по длине выемочного столба обеспечивается предложенной процедурой настройки компьютерной модели силовых и геометрических характеристик оборудования очистного забоя на основе ретроспективных данных измерения фактических характеристик горных пород и деформаций крепи;
5. эффективность принимаемых управленческих решений и рекомендаций по снижению рисков аварий в очистных забоях угольных шахт повышается

использованием имитационного моделирования и выявления положения опасных зон обрушения породного массива на основе разработанных принципов формирования новых видов компьютерных геоизображений на электронных картах;

- б. качество обработки геоинформации и эффективность управленческих решений при проектировании и эксплуатации горнотехнических систем повышаются, по сравнению с типовыми ГИС, за счет применения предметно-ориентированных программных решений, реализованных в виде специализированного ГИС-приложения, позволяющего прогнозировать геомеханическое поведение массива горных пород при ведении очистных работ.

**Научная новизна** работы состоит в том, что:

- впервые предложенные теоретические основы построения специализированных ГИС «виртуальная шахта» позволяют создавать адаптивные компьютерные системы моделирования геомеханических процессов в системах «углепородный массив очистного забоя – выработанное пространство – высокопроизводительный механизированный комплекс» для поддержки принятия решений в части повышения безопасности горных работ;
- обоснован и разработан новый подход к прогнозированию чрезвычайных ситуаций, связанных с обрушениями кровли в очистных забоях, основанный на использовании упреждающего пространственно-временного моделирования результатов техногенного воздействия на углепородный массив в движущемся комплексно-механизированном забое;
- разработан метод проектирования и реализации специализированных программных средств компьютерного моделирования НДС угольных и породных пластов с использованием средств электронного картографирования горно-геологического строения массивов горных пород, отличающийся использованием элементов теории нечетких множеств для повышения робастности этих средств;
- создана методика расчета параметров НДС углепородного массива в окрестности очистного забоя, включающая процедуру настройки алгоритма прогнозного моделирования на основе ретроспективных данных, что позволяет минимизировать отклонения вычисленных значений конвергенции оснований и перекрытий секций крепи очистного комплекса от измеренных;
- разработанные информационное, математическое и программное обеспечение геоинформационной системы компьютерного моделирования динамических процессов изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя позволяют повысить достоверность результатов моделирования динамики разрушения элементов горного массива при отработке конкретных угольных пластов;
- предложенный метод визуализации результатов моделирования процесса геомеханического взаимодействия механизированной крепи с углепородным массивом позволяет подобрать для конкретных горнотехнических условий очистной механизированный комплекс с необходимыми силовыми характеристиками крепи на этапе разработки паспорта выемочного участка.

**Практическая значимость работы** заключается в:

- упрощении маркшейдерской подготовки горных работ при использовании специализированных программных средств электронного картографирования и хранилища данных о горно-геологическом строении массивов горных пород («виртуальной шахты»);
- уточнении прогнозируемых параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя при циклическом движении механизированного комплекса на основе ретроспективных данных о свойствах горных пород и фактических деформациях;
- определении положения опасных зон и информационной поддержке управленческих решений по предотвращению аварийных ситуаций с использованием предложенных видов компьютерных геоизображений;
- использовании разработанных теоретических основ построения специализированных ГГИС при реализации комплекса программ, защищенного шестью свидетельствами о разработке компьютерных программ и баз данных, для компьютерного моделирования геомеханического взаимодействия углепородного массива с механизированным комплексом очистного забоя;
- возможности применения разработанных методов моделирования и программных средств при выборе технологических схем отработки пологих угольных пластов Кузбасса и раскройке шахтных полей с изменяющимися горно-геологическими условиями.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, в развитии теоретических положений и анализе результатов научных исследований, в разработке методологических основ построения специализированной ГГИС и реализации программных средств электронного картографирования горно-геологического строения массивов горных пород, в разработке принципов исследования антропогенных систем на основе компьютерного моделирования динамики разрушения горных пород с учетом прогрессирующего снижения устойчивости пород кровли и вынимаемого угольного пласта, в разработке комплекса компьютерных программ для расчета параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива с учетом циклического воздействия на него секций механизированной крепи, в разработке принципов формирования компьютерных геоизображений новых видов для определения положения опасных зон в массиве горных пород.

Диссертантом разработаны модели и алгоритмы компьютерного моделирования, выполнены расчеты по конкретным проектам, проведен анализ полученных результатов и их сравнение с экспериментальными данными, предложены технологические решения. При личном участии автора работы проводилась промышленная апробация предложенной специализированной ГГИС и внедрялись результаты работы.

**Реализация работы.** Результаты работы использованы при разработке специализированного программного обеспечения в рамках НИР Новокузнецкого института (филиала) ФГБОУ ВО КемГУ.

Основные научные положения и результаты исследований были использованы при разработке паспортов выемочных участков шахт ЗАО «Южкузбассуголь», ОАО «Шахта Абашевская – Н», ООО УК «Корчаколь».

Предложенная методология проектирования специализированных ГГИС использовалась при разработке реальных проектов, представленных на XVIII и XIX Сибирских промышленных форумах. Разработанные проекты получили положительную оценку и были удостоены диплома и бронзовой медали. Комплекс программных продуктов, вошедших в состав ГГИС, представленный на международной выставке-ярмарке «Кузбасский образовательный форум» и отмеченный золотой медалью, используется для проведения исследовательских и практических работ студентов и аспирантов в учебном процессе НФИ КемГУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях: III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий переработки вторичных ресурсов в Кузбассе» (г.Новокузнецк, 2009г.); экспертном совещании «Гуманитарные и социальные проблемы обеспечения безопасности горнодобывающих регионов» в рамках XVII Международной специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России. Майнинг – 2010» (г.Новокузнецк, 2010г.); XI-XIII международных научно-практических конференциях «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2011-2012 гг.); X-XII Всероссийских научных конференциях с международным участием «Краевые задачи и математическое моделирование» (г. Новокузнецк, 2010-2015 гг.); Международной научно-методической конференции (Воронеж, 2011-2012г.), Международном симпозиуме «Неделя горняка» (2013г.); на заседаниях научных семинаров факультета информационных технологий (Новокузнецк, 2011-2015г.).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 44 печатных работы, в том числе 17 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 1 монография, 20 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций, 6 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 237 наименований объемом в 313 страниц, включает 95 рисунков и 9 таблиц.

Диссертация выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой РЕОИС – Развитие единой образовательной информационной среды (2001-2005), ГК-1351 "Создание ресурсного центра регионального уровня в Кемеровской области"; планом НИР НФИ КемГУ 2008г., проект №12-05/62 "Аналитический обзор современных методов и программных средств математического моделирования в управлении организационно-техническими системами" по заказу ООО «Опт-Трейд»; программой Кузбасского НОК-1, в рамках программы "Недра Кузбасса", проект № 27-6 "Разработка системы прогноза параметров высокоинтенсивных технологий угледобычи угольных шахт Кузбасса", ГР №01970004330.



## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во** введении обоснована актуальность решаемой проблемы, установлены цель и задачи исследований; сформулированы научные положения, выносимые на защиту; описывается структура диссертации.

**В первом разделе** содержится обзор и анализ информационных систем для поддержки принятия управленческих решений при ведении горных работ. Мощные интегрированные системы горного профиля Vulkan, MineScape, Linx, MineSight, Gemcom, Surpac известны уже более 30 лет. Для месторождений с несложными геологическими условиями они хорошо работают и предоставляют горным инженерам набор полезных инструментов для моделирования запасов месторождений и горного планирования. Системы способны обеспечивать управление базами данных, предобработку исходной информации, моделирование массивов горных пород и выработок, проектирование и календарное планирование горных работ.

Возможность создания метода моделирования антропогенных изменений возникла на стыке нескольких наук и научных направлений: геологии, изучения напряженно-деформированного состояния горного массива, геоинформатики и др. Большой вклад в развитие теоретических и прикладных аспектов проектирования и разработки геоинформационных систем внесли Алексеев В.В., Ивакин Я.А., Куракина Н.И., Попович В.В., Сурков Ф.А., Шек В.М., Аленичев В.М., Потресов Д.К. и др., основ геоинформатики – Берлянт А.М., Бескид П.П., Биденко С.И., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др., методов математического моделирования геомеханических процессов – Александров А.Я., Амусин Б.З., Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Кузнецов С.Т., Курленя М.В., Фрянов В.Н., Ивакин С.Н. и др. Растущее внимание мирового научного сообщества к проблемам геоинформационного моделирования нашло отражение в работах Burrough P.A., McDonnell R.A., Morrison J.L., Zeiler M., Fedra K., Goodchild M.F., Gijbbers P.J.A., Lam D., Leon L., Letcher R.A. и многих других.

Современный этап развития информационных технологий характеризуется широким применением математических методов для моделирования, анализа и оценки состояния природно-хозяйственных комплексов. Так как в таких системах существенную роль играют пространственные аспекты, то эффективное решение задач безопасности ведения горных работ с учетом пространственных отношений между объектами отрасли и неоднородностью среды, в которой они находятся, является основой для проектирования горнотехнических систем в целях эффективного отраслевого управления по снижению риска аварийных ситуаций. Поскольку ведение выемочных работ может сопровождаться горными ударами, выходом метана и другими нештатными ситуациями, то для принятия проектных и технологических решений необходим системный подход к анализу взаимообусловленных разнородных факторов, влияющих на состояние углепородного массива, ослабленного сложными по геометрии и топологии выработками и испытывающего воздействие со стороны технологического оборудования. Использование геоинформационного подхода в таких задачах весьма востребовано, т.к. позволяет прогнозировать процессы разрушения горных пород, с учетом пространственно-временной динамики ведения горных работ.

Горные информационные системы общего назначения могут быть использованы для решения узкого спектра задач угольной отрасли, однако, являются, с одной стороны, необоснованно перегруженными ненужными функциями и сложными в адаптации к условиям функционирования конкретного горного предприятия, с другой стороны, не реализуют большинства функций, необходимых для конкретных угольных предприятий. Отсутствие открытых интерфейсов разработчика и закрытый исходный код делают невозможным добавление требуемых функций без обращения к компании-разработчику.

На основе проведенного анализа обоснована необходимость разработки методологии и техники создания специализированных программных комплексов с открытой архитектурой, базирующихся на принципах объектно-ориентированного подхода, сформулирована цель и определены задачи, решение которых в рамках диссертационной работы обеспечило бы ее достижение.

**Во втором разделе** сформулирована концептуальная основа разрабатываемой методологии проектирования геоинформационных систем для прогнозирования динамики состояния угледобывающего массива при ведении очистных работ. Проведена декомпозиция разрабатываемой методологии на ряд подзадач, связанных с разработкой архитектуры ГИС угледобывающего предприятия с разработкой методов моделирования горных работ, технологией проведения конечно-элементного анализа при моделировании движения очистного забоя и визуализацией результатов имитационного моделирования геомеханических процессов. Разработана концептуальная модель архитектуры специализированного программного обеспечения (СПО) геоинформационной системы (ГИС) угледобывающих предприятий (рис. 1),

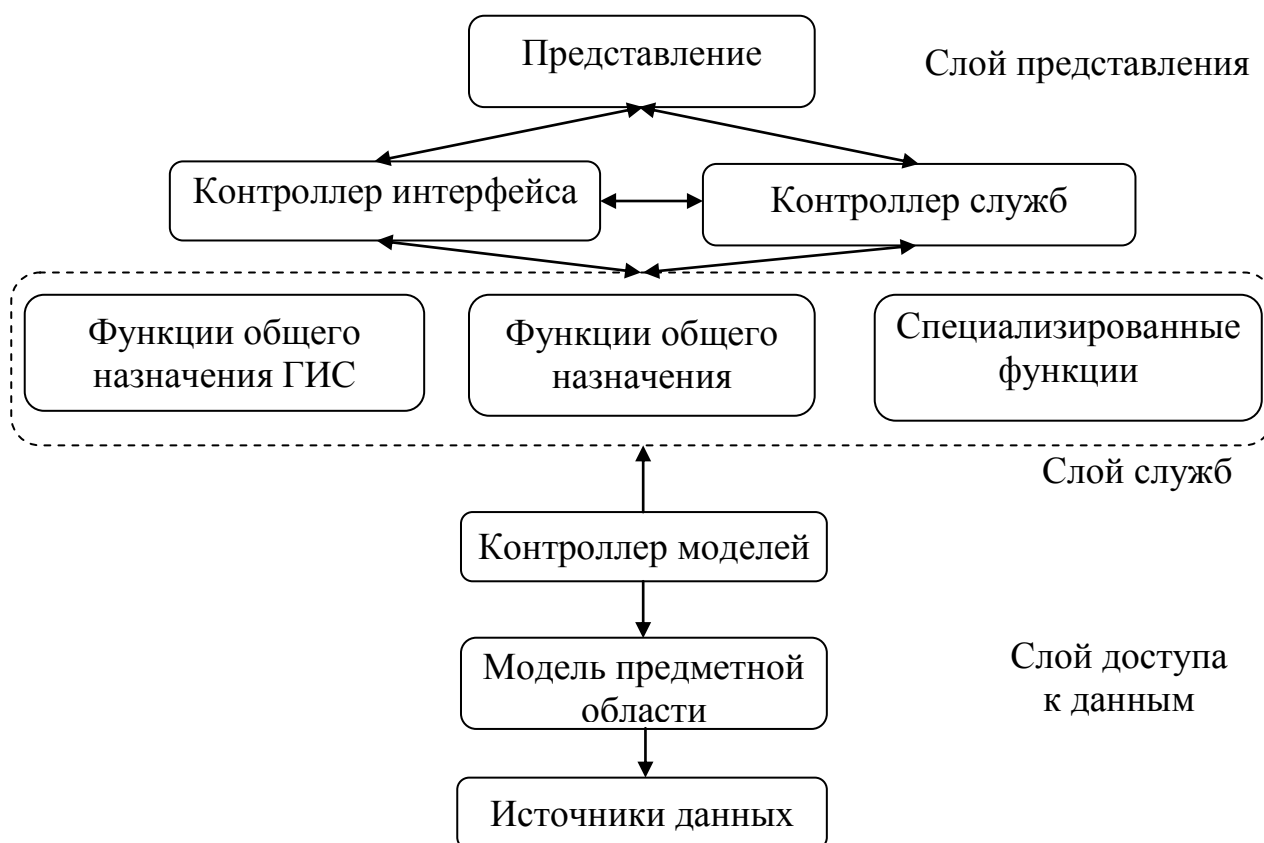


Рисунок 1. Концептуальная модель архитектуры СПО ГИС

включающая в себя три слоя: представление, бизнес-логика и доступ к данным.

Слой представлений отвечает за формирование графической картины структуры породных слоев и степени влияния механизированных крепей на техногенную ситуацию в зоне выемочных работ. Предоставляемый пользователю инструментарий зависит от внутренней структуры модели данных. Контроллер приложения и контроллер служб образуют тонкую прослойку, необходимую для согласования работы бизнес-логики и логики предметной области.

Логика предметной области выделена в отдельный слой, реализующий специальные функции, такие как: расчёт напряженно-деформированного состояния углепородного массива, автоматизация выбора сценариев отработки угольного пласта, прогнозирование изменения геометрии выработанного пространства и т.п. Предусмотрена возможность использования нескольких моделей данных, используемых службами, на основе приоритетов или асинхронно с учетом дополнительных сущностей при реализации логики взаимодействия с контроллерами и службами. Функции расчёта показателей напряженно-деформированного состояния углепородного массива тесно связаны с моделью предметной области и подразумевают использование внешних источников данных, таких как классификаторы и базы данных.

Необходимость контроллера моделей продиктована частым применением в ПО рассматриваемого класса адаптивных моделей, которые могут вести себя различным образом в зависимости от текущих параметров системы. Предусматривается возможность применения DSL для их настройки.

Слой источников данных инкапсулирует средства, необходимые для работы с электронными классификаторами, векторными и растровыми картами, пространственными СУБД и другими источниками данных. Чаще всего данный слой взаимодействует только с моделью предметной области. Однако в зависимости от решаемых задач может возникнуть необходимость обращения функций общего назначения к источникам данных.

Добыча полезного ископаемого сопровождается различного рода геомеханическими процессами, в том числе горными ударами и внезапными выбросами угля и газа. Надлежащее качество управления таким сложным объектом может быть достигнуто только путем изучения пространства различных технологических и организационно-управленческих решений на основе имитационного моделирования. Это позволяет на базе единой теоретической платформы имитировать процессы функционирования и взаимодействия технологических подсистем и горной среды с учетом пространственно-временной динамики ведения горных работ. В имитационной модели поведение компонентов сложных систем описывается набором алгоритмов, реализующих ситуации, возникающие в реальной системе "механизированная крепь–углепородный массив". Моделирующие алгоритмы позволяют по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии сложных систем и фактических значениях параметров, отображать реальные явления в системе и получать данные о возможном поведении сложной системы в каждой конкретной ситуации. При прогнозировании учитывается предшествующее состояние и прогрессирующая динамика

дезинтеграции горных пород в зоне техногенного воздействия, что позволяет получать более достоверные результаты.

Таким образом, имитационное моделирование представляет собой многошаговый итеративный процесс, включающий в себя формализацию и корректировку модели, начиная с вербального способа ее описания на базе специализированной ГИС, структура которой представлена на рисунке 2.

Имитация движения забоя при моделировании напряженно-деформированного состояния углепородного массива с учетом его циклического движения осуществляется шагами, состоящими из трех тактов.

В первом такте подается давление в гидросистему и происходит распор верхнего перекрытия крепи и пород кровли. Породы кровли за счет сжатия деформируются, и, если в них возникают напряжения выше предельного состояния, происходит их разрушение на отдельные куски с образованием трещин, т.е. наблюдается переход сплошной среды к дискретной.

Во втором такте происходит снятие угольной стружки. Крепь находится в



Рисунок 2. Структура специализированной ГИС для моделирования геомеханических процессов в очистном забое

пережном состоянии, но увеличивается расстояние от поверхности забоя до механизированной крепи. Над козырьком и впереди секции крепи возможно высыпание дискретного породного массива, что приводит к образованию куполов.

В третьем такте выполняется разгрузка крепи и вмещающих пород. Происходит передвижка разгруженной секции крепи к поверхности забоя, при этом объем незакрепленных пород увеличивается и за передвинутую часть секции они вообще могут разрушиться.

Изучение характера изменений НДС углепородного массива в зоне влияния движущегося очистного забоя производится на математической модели, представляющей собой объединение семейств конечных множеств, первое из которых является множеством функций, связывающих значения перемещений физических точек углепородного массива и варьируемых горно-геологических и (или) горнотехнических факторов, а второе – множеством функций, связывающих значения напряжений и варьируемых факторов:

$$M = F(u_i, \Phi_i) \cup G(\sigma_i, \Phi_i), \quad i = 1, 2, 3 \dots k, \quad (1)$$

Каждое из семейств (1) распадается на  $k$  подмножеств, каждое из которых характеризует влияние  $i$ -го фактора на изменение характера НДС углепородного массива в зоне влияния очистного забоя:

$$\begin{aligned} F_i(u, \Phi) &\subset F(u, \Phi_i), \\ G_i(\sigma, \Phi) &\subset G(\sigma, \Phi_i). \end{aligned} \quad (2)$$

Для выбранного горно-геологического или горнотехнического фактора множества  $F_i(u, \Phi)$  и  $G_i(\sigma, \Phi)$  представляют собой совокупности подмножеств мощности  $n$ , где  $n$  – количество значений варьируемого фактора. В свою очередь, каждое из подмножеств этой совокупности представляет совокупность подмножеств – кадров для различных фиксированных положений очистного забоя и секции механизированной крепи, имитирующих движение в пространстве выемочного столба. Каждый из кадров представляет собой конечное множество мощности  $l$  значений перемещений в узлах (напряжений в конечных элементах), где  $l$  – количество узлов или конечных элементов.

Перемещения в выбранных узлах являются включением множества, представляющего собой поле перемещений в узлах области исследований. Поле перемещений получаем путем решения системы уравнений, которые в матричной форме имеют вид

$$|K| * \{U\} = \{F\}, \quad (3)$$

где  $|K|$  – глобальная матрица жесткости;

$\{U\}$  – вектор перемещений;

$\{F\}$  – глобальный вектор-столбец нагрузок (внешних сил).

Такая система может быть получена путем минимизации полной потенциальной энергии системы, которая состоит из двух частей, одна из которых соответствует энергии деформаций в теле, а другая определяется потенциальной энергией приложенных нагрузок:

$$\Pi = D - P_w \quad (4)$$

где  $D$  – энергия деформаций;

$P_w$  – работа внешних сил.

Связь между деформациями и перемещениями определяются как

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{dv}{dy}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \quad \text{или с учетом формулы (10):}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{vmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{2i-1} \\ u_{2i} \\ u_{2j-1} \\ u_{2j} \\ u_{2k-1} \\ u_{2k} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Из формулы (11) можно получить матрицу  $|B|$  на основании того, что  $\{\varepsilon\} = |B| * \{U\}$ . Элементы матрицы вычисляются как

$$\begin{aligned} b_i &= Y_j - Y_k, & b_j &= Y_k - Y_i, & b_k &= Y_i - Y_j \\ c_i &= X_k - X_j, & c_j &= X_i - X_k, & c_k &= X_j - X_i \end{aligned} \quad (6)$$

где  $i, j, k$  – номера сторон треугольника;

$X_i, Y_i, X_j, Y_j, X_k, Y_k$  – координаты вершин;

$A$  – площадь треугольного симплекс-элемента.

Для разномодульной механики сплошной среды матрица жесткости определяется согласно исследованиям С.А.Амбарцумяна. Он предлагает в этом случае рассчитывать напряжения по формулам плоской деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{A_1} \varepsilon_x - \frac{\mu_1}{A_1} \varepsilon + B_3 \left( \frac{\mu_1}{A_1} - \frac{m_1^2}{A_1} \right) * \sigma_2, \\ \sigma_y &= \frac{1}{A_1} \varepsilon_y - \frac{\mu_1}{A_1} \varepsilon + B_3 \left( \frac{\mu_1}{A_1} - \frac{m_2^2}{A_1} \right) * \sigma_2, \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{2A_1} \varepsilon_{xy} - \frac{B_3}{A_1} m_1 m_2 \sigma_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \varepsilon_x, \varepsilon_y$  – нормальные напряжения и смещения по осям координат;

$\tau_{xy}, \varepsilon_{xy}$  – касательные напряжения и деформации;

$\sigma_2$  – главное минимальное напряжение в плоскости XY;

$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y$ .

Согласно представленным формулам (7) и принятым обозначениям остальных параметров матрица деформационных свойств разномодульного материала вместо (5) примет вид

$$|D| = \frac{1}{A_1} \cdot \begin{vmatrix} (1-\mu) & (-\mu) & \frac{B_3}{\varepsilon_{xy}^*} (\mu_1 - m_1^2) \cdot \sigma_2 \\ (-\mu) & (1-\mu) & \frac{B_3}{\varepsilon_{xy}^*} (\mu_1 - m_2^2) \cdot \sigma_2 \\ 0 & 0 & 0,5 - \frac{B_3}{\varepsilon_{xy}^*} m_1 \cdot m_2 \cdot \sigma_2 \end{vmatrix} \quad (8)$$

После решения системы уравнений, определения смещений вершин треугольников и вычисления деформаций  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ , определяются для каждого момента главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  :

$$\sigma_1 = \frac{A_2}{2\omega_b}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{b_{22} + b_{12}}{2\omega_b} \sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2},$$

$$\sigma_2 = \frac{A_2}{2\omega_b}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{b_{11} + b_{12}}{2\omega_b} \sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2}. \quad (9)$$

На заключительном этапе вычисляются напряжения по осям координат согласно приведенным формулам (7). Разработанный алгоритм был положен в основу компьютерной программы расчета параметров НДС углепородного массива в окрестности КМЗ, учитывающей знакопеременное воздействие секции механизированной крепи на боковые породы при ее циклическом движении.

Одним из методов визуализации данных является картографирование. Объекты техногенного взаимодействия отображаются в виде графических изображений и, если существует географическая привязка, проецируются на реальные территории. Инструменты OLAP или Data Mining превращают процесс визуализации в один из этапов итерационного анализа данных. Результаты математического моделирования размещаются в различных базах данных. Использование описанных выше технологий предоставляет пользователям возможность проведения детального анализа процессов выемки полезного ископаемого путем получения “срезов” по результатам математического моделирования в любых местах географического размещения объекта.

Задача визуализации изменения состояния углепородного массива во времени решается путем выдачи на экран последовательности статичных изображений (кадров), представляющих собой набор анимационных поверхностей. Структура модели построения геопространственных изображений представлена на рисунке 3. Следует отметить, что речь о проекции для анимированных анаморфоз можно вести лишь условно, так как в ходе анимации контуров происходит динамическое изменение пространства, которое может быть описано семейством проекций покадрового изменения отображаемого пространства.

**В третьем разделе** осуществлена разработка новых и адаптация типовых компонентов региональной геоинформационной системы для имитационного моделирования динамики проведения горных работ. Обосновано и приведено решение таких задач, как:

- разработка структуры горных информационных систем на базе ГИС-технологий;
- разработка баз геофизических данных и горношахтного оборудования для создания специализированных ГИС;
- адаптация методов моделирования напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя;
- разработка методов визуализации результатов моделирования.

При создании региональной ГГИС были выработаны концептуальные требования и разработана структура геоинформационной системы для оценки целесообразности и мониторинга ведения горных работ, а также выработки комплекса мероприятий по обеспечению стабильной и безопасной высокопроизводительной работы комплексно-механизированных забоев. Такая ГГИС должна включать в себя следующий набор подсистем:

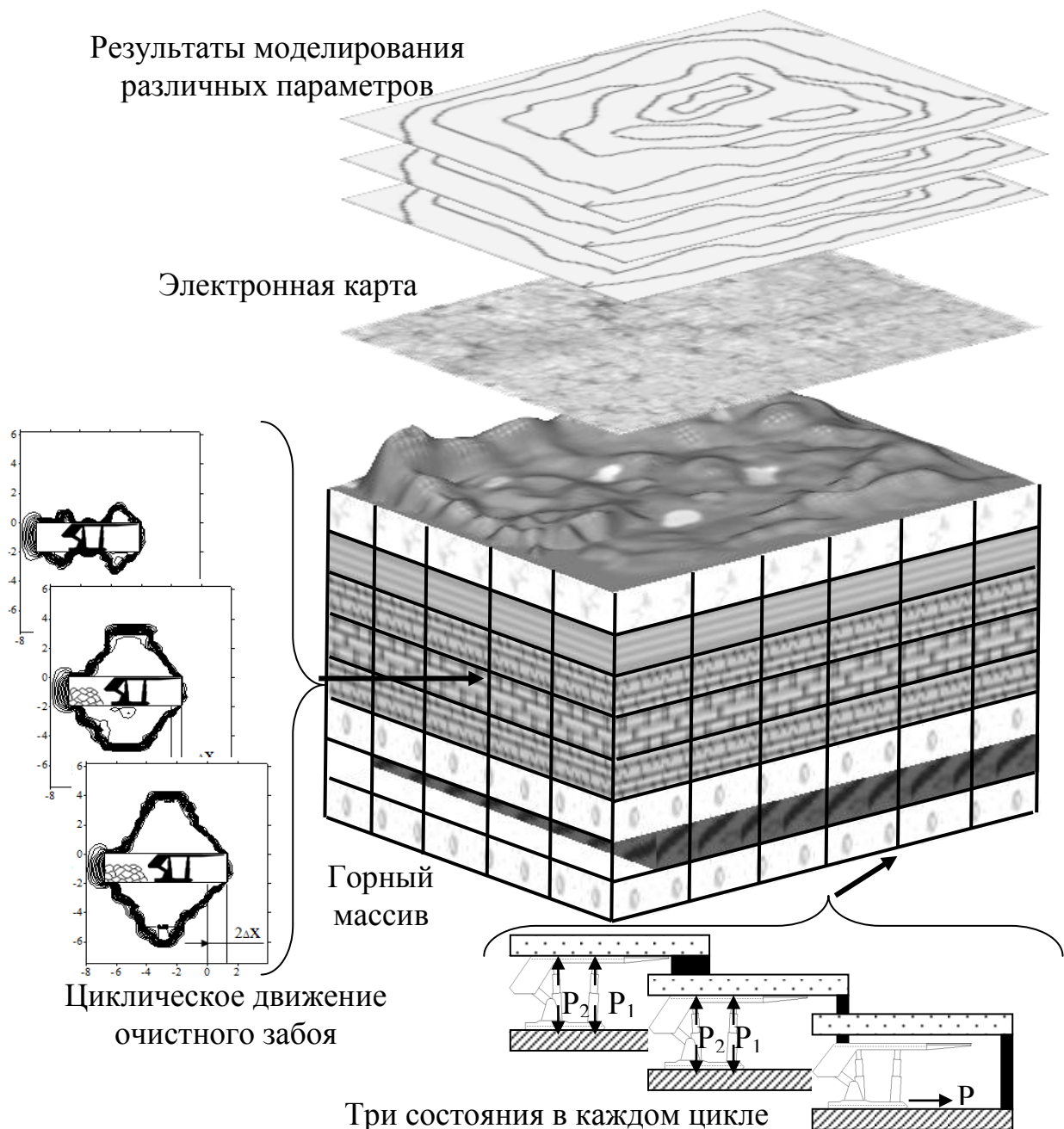


Рисунок 3. Модель построения пространственных геоизображений

1. Электронный атлас ведения горных работ;
2. Подсистема формирования базы геологоразведочных данных;
3. Графический редактор объектов электронных карт;
4. База данных горношахтного оборудования;
5. Подсистема моделирования напряженно-деформированного состояния углеспородного массива в окрестности очистного забоя;
6. Инструментальные средства визуализации.

Для обеспечения интеграции с существующими ИС предприятий компонентная модель разрабатываемой программной системы учитывает реализацию соответствующих внешних интерфейсов сторонних приложений. Набор электронных карт служит только для визуализации полученных результатов. Программный каркас подключается к общей модели ГИС как библиотека. В зави-



симости от типа приложения, платформы и применяемых технологий некоторые элементы программной системы и интерфейсы могут быть иными, однако концепция останется прежней.

Цифровые модели пространственных данных объектов включают три составные части: топологическую, геометрическую и атрибутивную. Управление атрибутивной частью данных обычно возлагается на *системы управления базами данных (СУБД)*, встроенные в программные средства ГИС или внешние по отношению к ним. Выбор или проектирование СУБД осуществляется на основе интегрированного подхода, предполагающего хранение и управление атрибутивной и тополого-геометрической частями данных в среде единой СУБД.

Разработка концепции единой базы геофизических данных, используемых для моделирования динамики состояния углепородного массива при ведении выемочных работ, может быть представлена в виде последовательного перехода от общих понятий предметной области к более точным и конкретным, образующим информационное представление реальных объектов.

Каждый объект «Выемочный блок» содержит данные множества стратиграфических колонок, в которые кроме атрибутивных параметров (множества слоев горных пород) включены и пространственные параметры. Схема информационных связей между блоками представлена на рисунке 4.

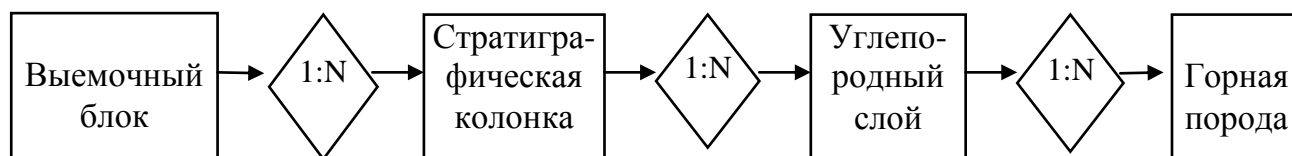


Рис. 4. Схема информационных связей между блоками

Расчетные данные каждой модели могут быть сгруппированы по «срезу» области исследования, в границах которых производится моделирование. Обобщенные геофизические данные по каждому «срезу», подлежащие хранению в единой базе данных, представлены на рисунке 5.

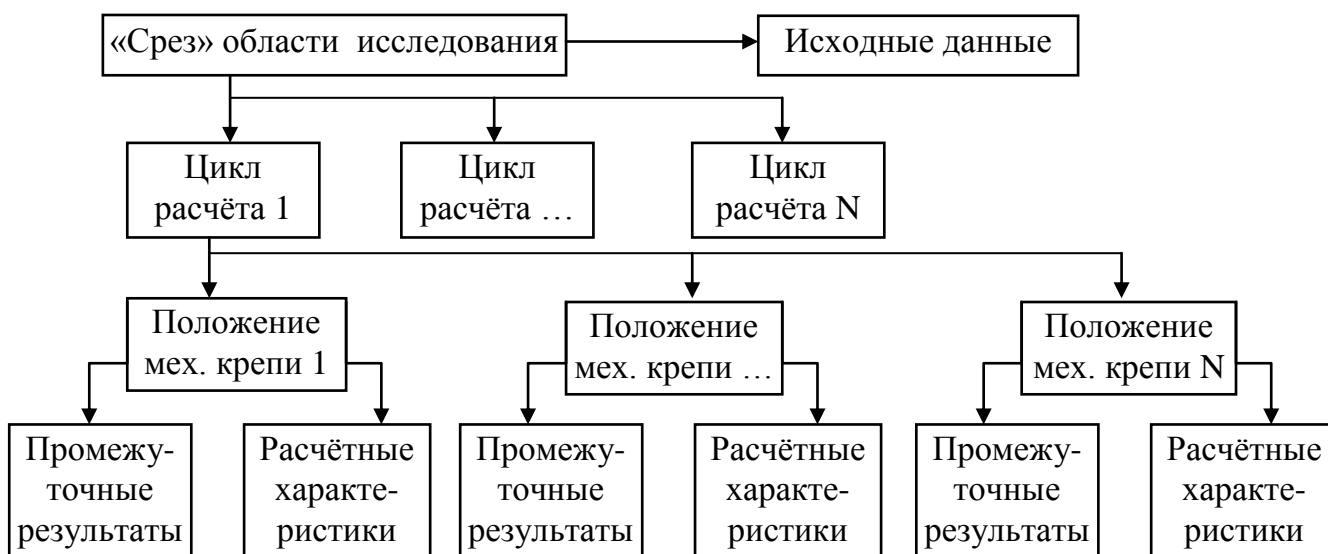


Рисунок 5. Схема обобщенных геофизических данных «среза»

При расчете нагрузок, действующих на механизированную крепь, имеем сложную систему, в которой принимают участие анизотропный углепородный массив, выработанное пространство и секция механизированной крепи. Отличительной особенностью этой системы является изменение ее геометрических и механических параметров во времени и пространстве. Это требует адаптации численных методов моделирования, поскольку имитация движения механизированной крепи относительно окружающей среды требует постоянного изменения данных о форме, размерах области техногенного взаимодействия и об измененных свойствах деформированного материала конечных элементов.

На основе разработанных алгоритмов был спроектирован комплекс компьютерных процедур, включающий в себя следующие модули (рисунок 6):

*Препроцессор* – производит дискретизацию области исследований на конечные элементы. Область исследований разбивается воображаемыми линиями или поверхностями на достаточно большое количество конечных элементов, связанных между собой в конечном числе узловых точек. Узловые точки при этом располагаются на линиях раздела породных слоев, на контуре выработанного пространства, на контурах деталей секции механизированной крепи и внутри указанных участков.

*Расчетная часть* – производит расчет смещений в узлах триангуляционной сети и напряжений в конечных элементах. *Постпроцессор* – преобразует формат полученных данных для их дальнейшего использования в специализированных пакетах, таких как Excel, MatCad, Surfer и т.п.

Элементы алгебраической теории автоматных моделей, синтеза типовых конструктивных моделей упростили процесс получения сложных графических изображений. Основным технологическим процессом на этом этапе является *графическое моделирование*, методы которого инвариантны к структурам баз данных и техническим средствам. При построении многообразия изображений может быть использован классический метод главных компонент, при использовании которого плоскости над данными строятся по двум главным компонентам, получающимся в результате дальнейшей обработки данных. Предложенная технология моделирует данные многообразиями малой размерности.

Для временного анализа растровых изображений в ГИС используются массивы данных, представляющие собой результаты расчета параметров геомеханического взаимодействия механизированного забоя с вмещающими породами. Ценность такого рода данных заключается в их актуальности и достоверности, поэтому часто используемый вид анализа в этой группе - временной. Сравнением оцениваются результаты расчетов различной давности и таким образом, прослеживается динамика произошедших изменений. Довольно часто анализируются пространственные взаимосвязи двух или нескольких явлений. Экстраполяция и интерполяция получаемых зависимостей производится линейно и с помощью формул Карлемана.

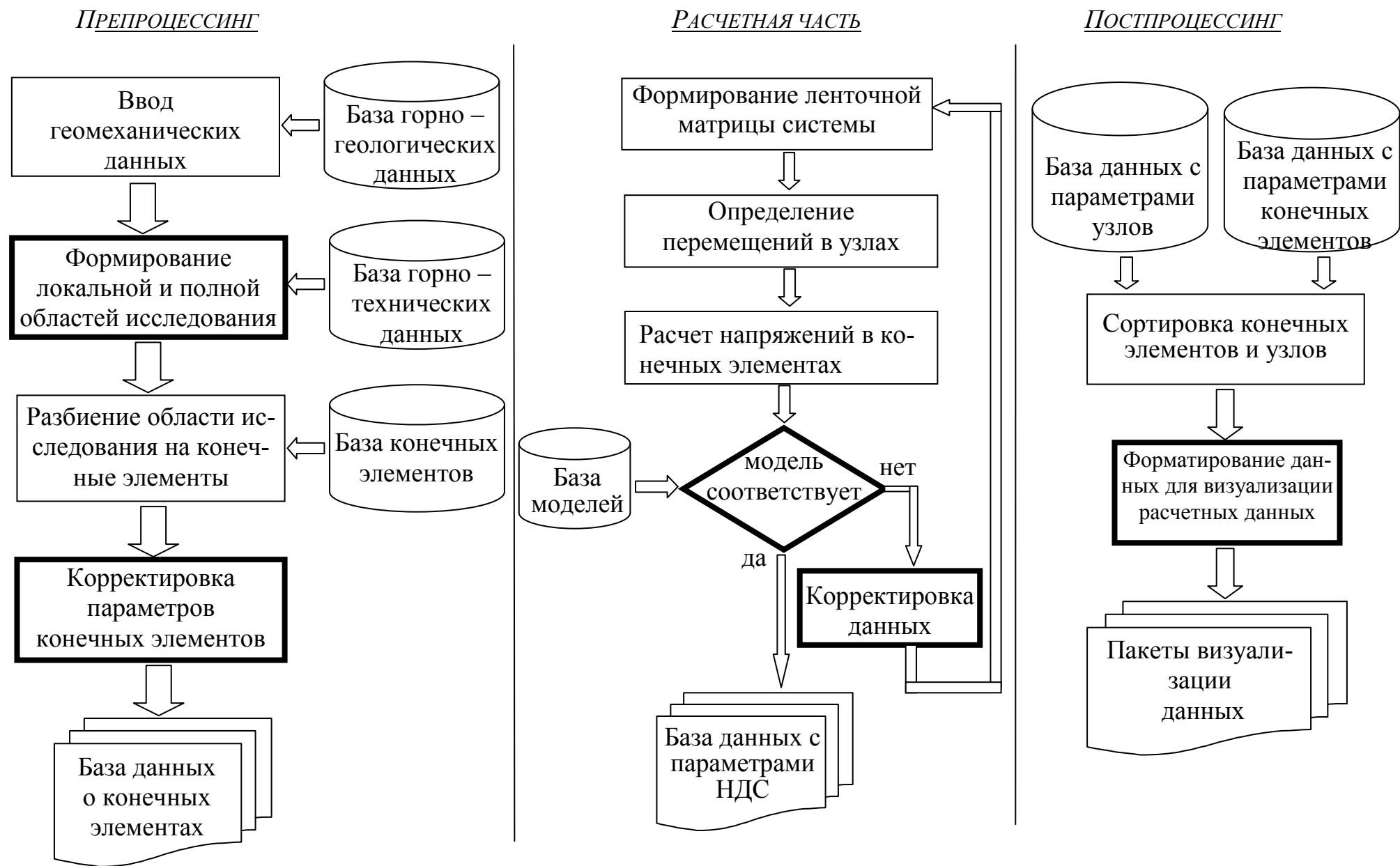


Рисунок 6. Этапы и модули решения задачи методом конечных элементов

**В четвертой главе** на основе предложенных ранее методов и технологий разработано алгоритмическое и программное обеспечение для электронного картографирования результатов исследований на примере Кузбасского угленосного бассейна. Рассмотрены вопросы расширения функциональности электронного картографирования к поставленным задачам, разработан специализированный графический редактор объектов электронных карт, приведено программное обеспечение для построения компьютерных геоизображений.

Контроль процесса добычи полезных ископаемых осуществляется с использованием тематических электронных карт. Это позволяет учитывать пространственно-атрибутивную привязку значимых объектов при обработке оперативной информации и проведение мониторинга состояния экологической ситуации в зоне ответственности угледобывающих предприятий, что, в свою очередь, позволяет получать более точные результаты расчётов и тем самым осуществлять информационную поддержку при ведении горных работ. Объектная декомпозиция задач позволила выявить следующие сущности (рисунок 7):

1. Электронная карта;
2. Объект электронной карты;
3. Прецедент взаимодействия объектов.

Электронная карта состоит из следующих частей:

1. *Классификатор (файл ресурсов)*. Содержит общее описание слоев, объектов, условных знаков и правил отображения объектов. Объекты группируются в слои по определенному признаку.

2. *Район работ (атлас)*. Атлас содержит данные о количестве листов, из которых состоит карта, и некоторые правила отображения. Листы должны быть с одинаковым масштабом и системой координат. Это позволяет отображать атлас как единое целое и динамически масштабировать его, но при этом каждый лист можно перерисовывать, не затрагивая остальную карту.

3. *Лист карты*. Содержит данные о масштабе, системе координат и объектах. Метрические, семантические характеристики объектов и типы локализации (площадной, точечный, векторный). Первый лист является подложкой.

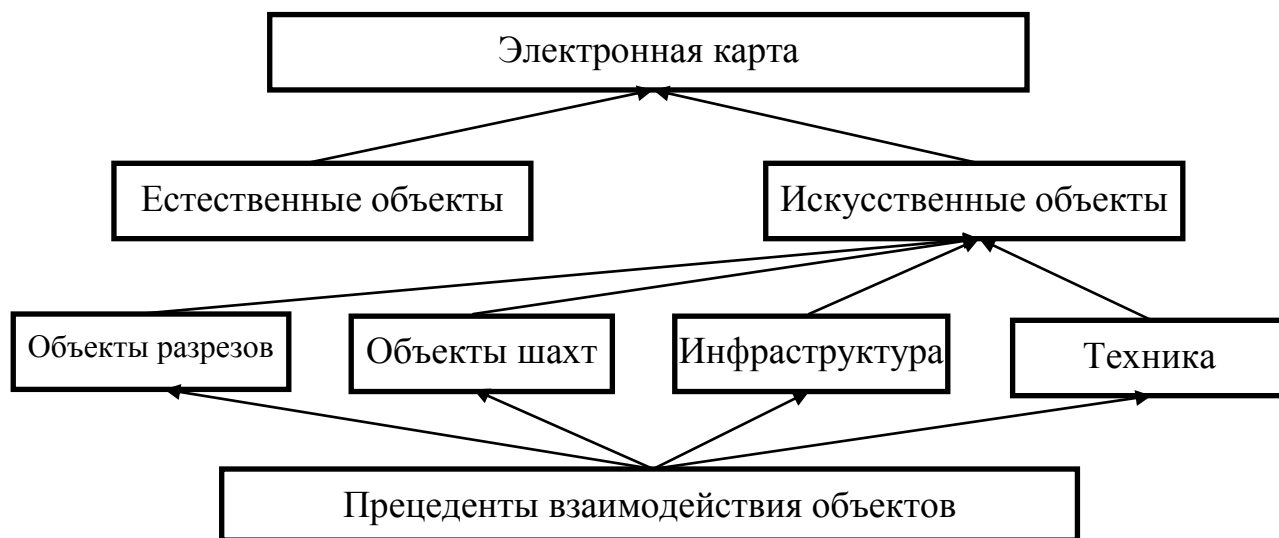


Рисунок 7. Иерархическая структура объектов электронной карты

4. *Объект.* Относится к определенному слою, имеет уникальные характеристики. Объекты подразделяются на специализированные и общего назначения. К объектам общего назначения относятся леса, реки, дороги и т.д. К объектам специализированного назначения относятся шахты, карьеры и т.п.

5. *Характеристики.* Уникальные характеристики объектов, базирующиеся на типах, разрешенных для данного листа электронной карты.

Данные в ГИС представляются в виде сетки или матрицы. Узлы сети соответствуют географическим координатам и содержат количественные и качественные значения процессов, что позволяет строить пространственно-цифровые модели, проводить статистические расчеты, проводить анализ рассматриваемых явлений и процессов, сравнивать результаты вычислительных экспериментов. Технология получения данных из ГИС в приемлемой для обработки форме распадается на ряд подзадач:

- создание сеточного слоя для растривания векторного изображения;
- получение матричной модели слоя по векторным данным в узлах регулярной сетки цифровой поверхности;
- фильтрация (сглаживание, выделение контуров, контраст).
- визуализация матричных моделей, ввод и доводка слоя в ГИС.

В качестве основных элементов интерфейса используются две тематические карты. Каждая из них служит для решения определенных задач. Первая – включает элементы геологоразведочных данных, данные о режимах геологических срезов, элементы интеграции со сторонними приложениями. Вторая – представляет собой интерактивный геологический срез, полученный в результате обработки механических свойств породного массива и служит для визуализации слоев, изменения их характеристик

Результаты имитационного моделирования представляются в виде полей напряжений или смещений в исследуемом объеме углепородного массива или в виде диаграмм построенных как в специализированных редакторах, так и в коммерческих приложениях. На рисунке 8 показан вид окна с отображением результатов расчета горизонтальных напряжений в конечных элементах.

**Пятый раздел** посвящен вопросам разработки инструментария для моделирования НДС углепородного массива при ведении очистных работ. Рассмотрены такие проблемы, как:

- построение расчетной модели;
- совокупность факторов, учитываемых моделью;
- инструментальные средства построения геометрической модели;
- расчетно-экспериментальное моделирование НДС углепородного массива с учетом циклически движущегося очистного забоя;
- инструментально-программные средства моделирования геомеханических процессов в окрестности очистного забоя.

Настройку модели производили с помощью симплексного метода оптимизации на основе результатов натуральных измерений конвергенции основания и перекрытия секций механизированных крепей. Для повышения достоверности результаты натуральных измерений подвергали предварительной обработке: осу-

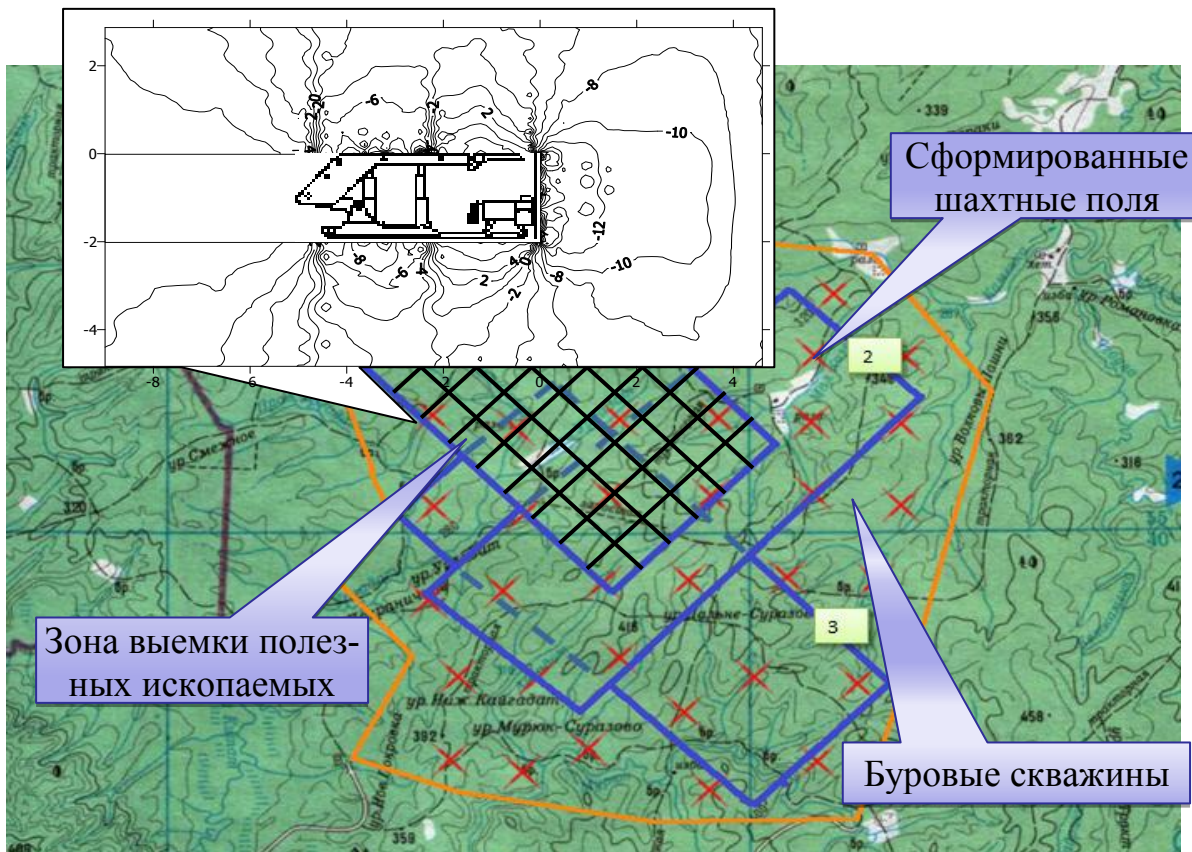


Рисунок 8. Рабочее окно графического редактора

существляли визуальный анализ данных, отфильтровывали выбросы, производили расчет необходимых статистик. Достоверность получаемых результатов проверялась путем сравнения с реальными данными выемочных участков полных пластов, обрабатываемых длинными комплексными механизированными забоями в условиях шахт южного Кузбасса.

Исследованы алгоритмы автоматического формирования триангуляционной сети, интерактивного трансформирования и совмещения узлов с проекциями элементов секции крепи в выработанном пространстве и стратиграфией угленосного массива с учетом гипсометрии. Использование динамических структур размещения данных позволило ослабить ограничения на количество узлов, что дало возможность поддерживать достаточную точность вычислений при проведении вычислительных экспериментов.

Адаптация метода конечных элементов обеспечивалась за счет:

- настройки параметров модели по экспериментальным данным;
- неравномерной дискретизации области исследований на конечные элементы;
- интерактивной корректировки узлов и параметров конечных элементов;
- включения модели накопления деструктивных изменений в горных породах.

Прогнозирование НДС осуществлялось с помощью пошаговой процедуры имитационного моделирования процесса взаимодействия угленосного массива с угледобывающим комплексом. Методика прогноза параметров геомеханического взаимодействия реализован в виде программно-технического комплекса, состоящего из пяти относительно автономных модулей, представленных на рисунке 9. В качестве интегрального показателя механических

свойств пород принимался коэффициент крепости по Протоdjяконову. Кроме него при проведении расчетов использовали: модуль упругости, коэффициент Пуассона, отношение остаточной прочности к исходной.

**В шестом разделе** рассмотрены вопросы практической реализации горной информационной системы прогноза напряженно-деформированного состояния углепородного массива с использованием ГИС-технологий. Освещены такие вопросы, как:

- геоинформационное моделирование углепородного массива для планирования ведения подготовительных работ;
- геоинформационное моделирование шахтных полей для информационной поддержки горнодобывающего производства;

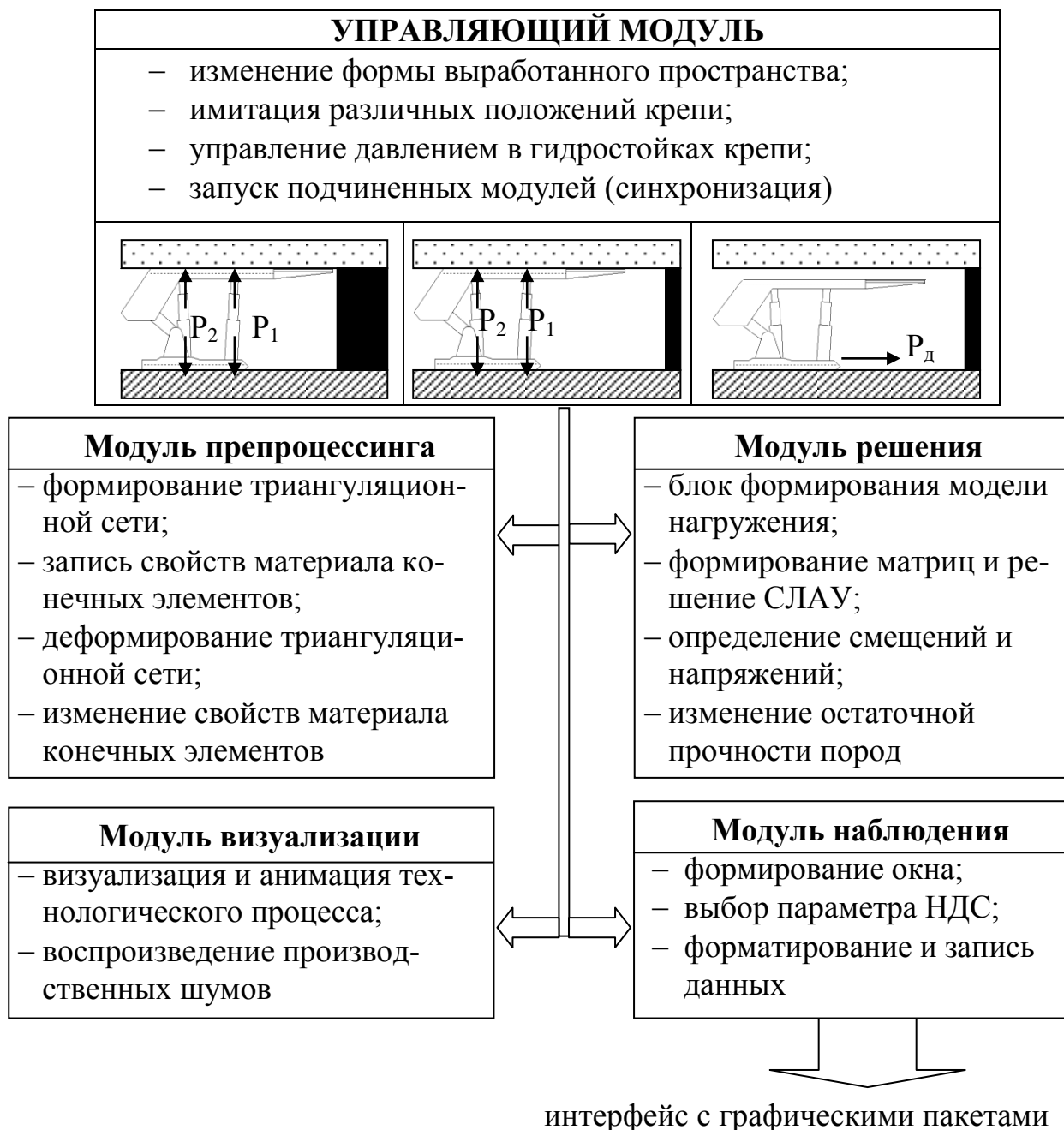


Рисунок 9. Методика прогноза параметров геомеханического взаимодействия механизированных крепей с углепородным массивом



- геоинформационное моделирование напряженно-деформированного состояния углепородного массива в движущемся очистном забое;
- размещение результатов моделирования на электронных картах.

Дан пример использования геоинформационного анализа для управления горным давлением при отработке угольных пластов.

Основой функционирования ГИС является тематическая карта района добычи полезных ископаемых, которая включает: буровые скважины с координатной привязкой, характеристики рельефа местности, дополнительные факторы (например, водные источники) и значимые объекты инфраструктуры. Возможность включения интеллектуальных подсистем в структуру региональной ГИС придает ей новое качество - способность конвертировать пространственные данные, осуществлять переход из одной системы понятий в другую, выражаемых в терминах целевого свойства (литолого-петрографического состава пород, координат перспективных участков, ожидаемых ресурсов полезных ископаемых и т.п.). По данным геологоразведки производятся расчеты профилей залегания углепородных пластов и по оптимизационным признакам выбирается шахтное поле для разработки полезного ископаемого. На следующем этапе осуществляется выбор горношахтного оборудования и его размещение с помощью специализированной СУБД силовых и технических характеристик механизированных крепей, выпускаемых различными заводами-изготовителями России. На рисунке 10 представлены окна рабочих программ, реализующих описанный этап.

Учет нарушения сплошности породного массива производится с использованием элементов нечеткой логики и математической графики. В простейшем случае для пологих пластов Кузбасса несплошность породного слоя определялась несоответствием соединяющих линий между стратиграфическими замерами ретроспективных данных.

Поскольку исследователю необходимо видеть общую картину размещения горного предприятия, на его схеме размещается стратиграфия пластов в зоне выемочного участка (рисунок 11).

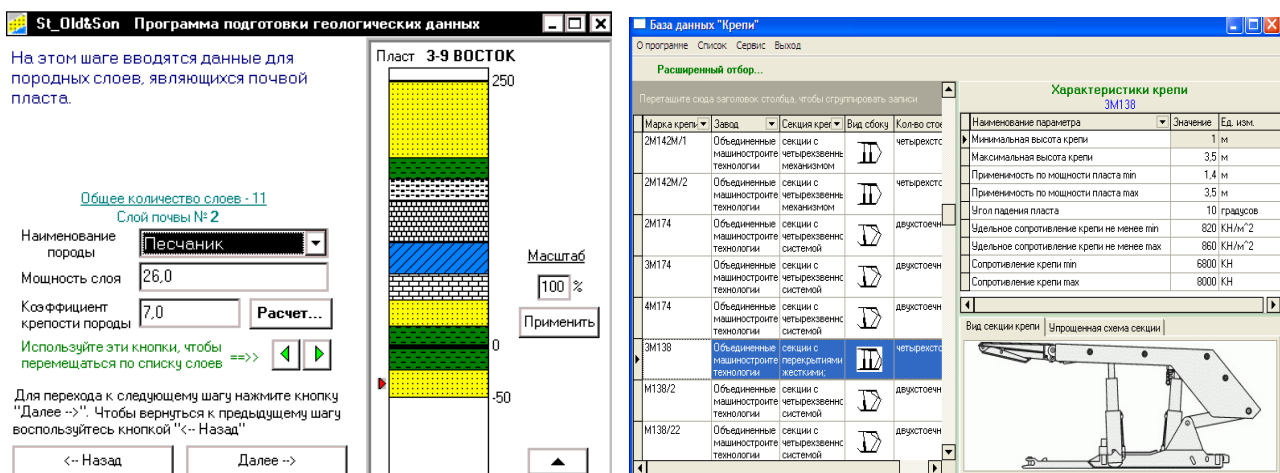


Рисунок 10. Окна работающих программ



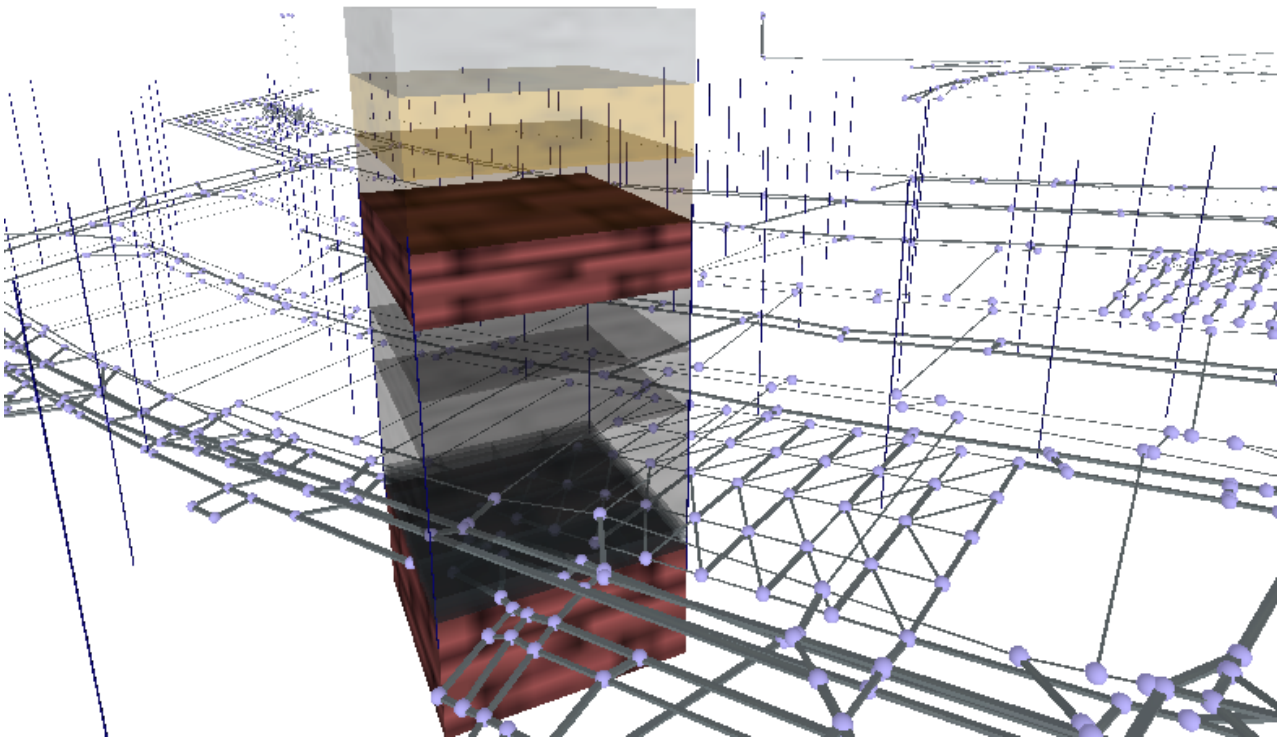


Рисунок 11. Компьютерная модель выемочного участка

После построения геометрической модели углепородных слоев запускается процесс моделирования движения очистного забоя. Управляющий модуль осуществляет имитацию циклического движения угольного комбайна, изменяя размеры и форму выработанного пространства, положение секции крепи, управляя давлением в гидростойках и т.п. В результате моделирования получают количественные оценки параметров геомеханического взаимодействия механизированных крепей с угольным пластом и вмещающими породами. Изолинии напряжений могут быть визуализированы как на поверхности электронной карты в области ведения горных работ, так и на отдельных срезах в пределах шахтного поля.

Результаты моделирования движения очистного забоя с определённым шагом хранятся в реляционной базе данных по принципу «ключ–значение». Это позволяет получать интересующие данные за линейное время вне зависимости от количества крепей и размеров базы данных.

Результаты уже проведенных вычислительных экспериментов позволили установить зависимости силовых и геометрических параметров механизированных крепей при фиксированных положениях очистного забоя от основных горно-геологических и горнотехнических факторов, таких как: глубина разработки, мощность угольного пласта, коэффициент крепости угля, длина консоли зависания кровли, рабочее давление в гидростойках крепи и других. При реализации дробной реплики полного ортогонального плана проведения вычислительных экспериментов в качестве базового варианта приняты условия выемочного участка 3-9<sup>восток</sup> шахты «Алардинская».

Установлены закономерности геомеханического взаимодействия механизированных крепей с углепородным массивом при первичных и вторичных

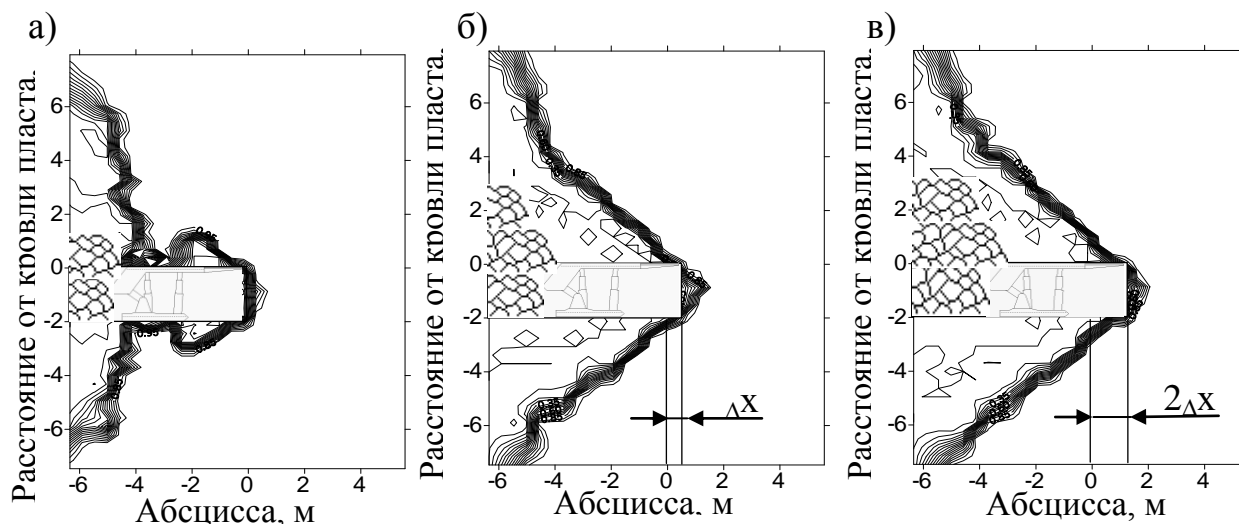


Рисунок 12. Накопление деструктивных изменений пород кровли

периодических осадках кровли с учетом прогрессирующего снижения устойчивости пород кровли при циклическом воздействии на них секций механизированной крепи и изменения параметров опорного давления. На рисунке 12 представлено изменение зоны разрушенных пород при движении очистного забоя.

Произведен анализ динамики изменения вертикальных смещений в породах кровли в зоне влияния секции механизированной крепи очистного забоя при установившемся режиме осадок пород кровли. Установлено, что с увеличением количества заходок величины вертикальных смещений в породах кровли увеличиваются в направлении выработанного пространства. После выемки угольной полосы при прежнем положении секции крепи точка с максимальной величиной вертикальных смещений перемещается внутрь угольного пласта, что может приводить к вывалу пород кровли в призабойное пространство.

Передвижка секции крепи к поверхности забоя без подпора сопровождается разрушением пород кровли над верхним перекрытием крепи и просыпанием мелких фракций за механизированной крепью. Серия проведенных вычислительных экспериментов позволяет выбрать оптимальную (с точки зрения выбранного критерия) и безопасную технологию выемки угля.

Таким образом, стабильность и безопасность высокопроизводительной работы КМЗ при разработке пластов с изменяющимися горно-геологическими условиями на этапе разработки проектной документации обеспечиваются имитацией динамики состояния углепородного массива при движении очистного забоя, прогнозом опасных зон и разработкой профилактических мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема, заключающаяся в развитии теоретических основ и разработке информационно-аналитического обеспечения геоинформационных систем моделирования динамики состояния углепородного массива при отработке угольных пластов для поддержки принятия управленческих решений при проектировании и

эксплуатации горнотехнических систем, имеющая важное народнохозяйственное значение для повышения безопасности ведения горных работ.

Основные выводы, научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Предложены теоретические основы построения специализированных ГГИС, позволяющие создавать адаптивные компьютерные системы поддержки принятия решений в процессе ведения горных работ, основанные на использовании стека уровневых моделей при проектировании и эксплуатации промышленных систем угольных предприятий в части повышения безопасности горных работ.
2. Осуществлено развитие функционально-объектного подхода к проектированию и программированию специализированных ГГИС. Доказано, что описание алгоритма в виде структуры взаимодействующих функциональных объектов достаточно для решения задач прогнозирования опасных ситуаций при ведении очистных работ.
3. Доказано, что информационно-аналитическое обеспечение ГГИС должно включать средства электронного картографирования горно-геологического строения угленосного массива, горных выработок и элементов технологических систем, а также средства компьютерного моделирования геомеханических процессов.
4. Разработана типовая конфигурация информационно-аналитического обеспечения в виде ГИС-приложения, отличающаяся наличием средств электронного картографирования и математического моделирования геомеханических процессов взаимодействия угленосного массива и технологического оборудования, что повышает полноту обработки информации по сравнению с типовыми ГИС и улучшает условия для принятия управленческих решений.
5. Разработана интегрированная геоинформационная модель хранения картографических данных и результатов моделирования геомеханических процессов в окрестности очистного забоя, основанная на использовании НО-LAP-технологии. Полученный банк пространственно-атрибутивных данных может использоваться как часть информационно-аналитической системы для поддержки принятия управленческих решений по проектированию горнотехнических систем.
6. Разработана концептуальная модель построения пространственных компьютерных геоизображений новых видов, позволяющая изучать динамику появления и развития зон повышенного давления для выработки рекомендаций по снижению аварийных ситуаций при ведении очистных работ комплексно-механизированными забоями.
7. Разработан и программно реализован метод имитационного моделирования геомеханических процессов взаимодействия механизированной крепи с угленосным массивом. Достоверность полученных результатов достигается компьютерным моделированием силовых и геометрических характеристик оборудования очистного забоя с учетом прогрессирующего снижения устойчивости пород кровли при циклическом воздействии на них усилий со

стороны секций механизированной крепи и подтверждается данными мониторинга состояния углепородного массива и крепи.

8. Предложена методика расчета параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестностях очистного забоя, включающая процедуру настройки алгоритма прогнозного моделирования на основе ретроспективных данных, что позволяет повысить достоверность прогноза зон, опасных по обрушениям и геодинамическим явлениям.
9. Научные результаты и практические рекомендации, разработанные автором, использовались при разработке паспортов выемочных участков шахт УК "Южкузбассуголь", а также в учебном процессе НФИ КемГУ. Проектирование специализированных программных средств моделирования горно-геологического строения массивов горных пород используется для создания студентами НФИ КемГУ специализированных геоинформационных систем и получения компьютерных геоизображений на основе пространственных данных Кузбасского углепородного массива и средств электронного картографирования.

### ПУБЛИКАЦИИ

#### *Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК России*

1. Степанов, Ю.А. Компьютерное моделирование в задаче обеспечения безопасности ведения горных работ [Текст]// Вестник НЦ ВОСТНИИ по безопасности работ в горной промышленности - Кемерово, 2016. -№ 1. - С.67-72 С.
2. Степанов, Ю. А. Об одном из способов хранения и анализа пространственно-атрибутивных данных угледобывающего предприятия [Текст]/ Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин // журнал "Информация и Космос". - 2015. - № 4. - С. 113-117
3. Степанов, Ю.А. Информационная система прогнозирования опасных зон повышенного горного давления в очистных забоях угольных шахт с использованием ГИС-технологий [Текст]/Степанов Ю.А., Бурмин Л.Н.//ИТ журнал «Безопасность труда в промышленности» - Москва, 2015. № 12. – С. 50-54
4. Степанов, Ю.А. Геоинформационные системы и промышленная безопасность угольных предприятий [Текст]// Вестник НЦ ВОСТНИИ по безопасности работ в горной промышленности – Кемерово, 2015. – № 4. – С. 50-54
5. Степанов, Ю.А. Методика построения компьютерной трехмерной модели шахты [Текст]/ Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин// Вестник компьютерных и информационных технологий – Москва, 2015. – №9.– С. 25-31
6. Степанов, Ю.А. Специализированная ГИС для моделирования процессов горного предприятия [Текст]/ Ю.А. Степанов, Л.Н. Бурмин// Геоинформатика. – Москва, 2015. – №1.– С. 3-8.
7. Степанов, Ю.А. Обеспечение информационной поддержки ведения горных работ с использованием ГИС-технологий [Текст]/ Ю.А. Степанов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2014. – №4. – С.118-122
8. Степанов Ю.А. О способе визуализации результатов моделирования работы очистного забоя с использованием электронных карт [Текст]/ Ю.А. Степанов // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2013. –№2. –С. 216-220.
9. Степанов Ю.А. К вопросу о разработке специализированного программного обеспечения на базе ГИС-технологий для угледобывающих предприятий

- [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С.Фанасков// Горный информационно-аналитический бюллетень (Mining informational and analytical bulletin). Москва, 2013. – №5. – С. 129-134.
10. Степанов Ю.А. Разработка архитектуры специализированного обеспечения на базе ГИС-технологий [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2012. – №4. – С. 207-210.
  11. Степанов Ю.А. Структура региональной геоинформационной системы при ведении выемочных работ угледобывающих предприятий [Текст]/ Ю.А. Степанов // Геоинформатика. - Москва, 2012. – №1.– С. 36-41.
  12. Степанов Ю.А. Определение шагов обрушений горных пород при их подработке подземными горными работами [Текст]/ Ю.А. Степанов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2011. –№ 4. – С. 44 – 45.
  13. Степанов Ю.А. Адаптация и развитие метода конечных элементов для расчета параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива [Текст]/ Ю.А. Степанов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2011. – № 4. – С. 31 – 34.
  14. Степанов Ю.А. Модель идентификации геомеханического взаимодействия механизированных крепей с углепородным массивом [Текст]/ Ю.А. Степанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (Mining informational and analytical bulletin). - Москва, 2011. – №7. – С. 39 – 44.
  15. Степанов Ю.А. Способы автоматизации процесса дискретизации области исследования на конечные элементы [Текст]/ Ю.А. Степанов, А.В. Степанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (Mining informational and analytical bulletin). - Москва, 2011. – №6. – С. 316-320.
  16. Степанов Ю.А. Модель управления состоянием экосистемы при воздействии техногенеза [Текст]/ Степанов Ю.А., Корчагина Т.В. Дмитриев Ю.В.// Вестник Кузбасского государственного технического университета. - Кемерово, 2007. – №6. – С. 87-88.
  17. Степанов Ю.А. Влияние секции механизированной крепи на геомеханические процессы в окрестности очистного забоя [Текст]/ Ю.А. Степанов, А.В. Степанов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2006. – №6. – С. 35-36.

#### ***Монографии***

18. Степанов Ю.А. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя [Текст]/ Ю.А.Степанов. – Новокузнецк, 2013. – 162 с.

#### ***Материалы научно-практических конференций, статьи в сборниках***

19. Степанов, Ю.А. Программа для мониторинга технологических процессов гидродобычи угля [Текст]/ Ю.А.Степанов, Л.Н. Бурмин // Ежемесячный научный журнал Евразийского союза ученых, часть 7. – М. 2014. №7. С. 142-144
20. Степанов, Ю.А. Об одном из способов визуализации геопространственных данных [Текст]/ Ю.А.Степанов, Л.Н. Бурмин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды между-

народной научно-практической конференции – Кемерово: СОРАН, Институт угля СОРАН, КузГТУ, 2013 С. 133-135

21. Степанов, Ю.А. Применение облачных технологий в ГИС [Текст]/ Ю.А.Степанов, В.С. Фанасков // Мат. II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по естественно-научному, экономическому, юридическому и социогуманитарному направлениям». – Новокузнецк, 2012. – С.186-190
22. Степанов, Ю.А. К вопросу о проектировании архитектуры специализированного программного обеспечения на базе ГИС-технологий [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков // Информационные системы и технологии: материалы международной научно-технической конференции. – Красноярск, 2012. - С. 127-131.
23. Степанов, Ю.А. К вопросу о применении адаптивных моделей при разработке программного обеспечения специализированных ГИС [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков // Высокие технологии, экономика, промышленность. Т.1 : сборник статей Тринадцатой международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". - Санкт-Петербург, 2012. – С. 135-136.
24. Степанов, Ю.А. Использование предметно-ориентированных языков в процессе электронного картографирования [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков, А.А. Боярчук // Интеллект и наука: труды XII Междунар. науч. конф./ отв. ред. А.В.Хныкин; Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии» СФУ; Железногор. филиал. – Красноярск, 2012. – С. 101-102.
25. Степанов, Ю.А. Разработка программного обеспечения специализированных геоинформационных систем [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков // Высокие технологии, фундаментальные исследования, экономика. Т.2: сборник статей двенадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург, 2011. – С. 115-116.
26. Степанов, Ю.А. Моделирование процессов выемки угля в очистных забоях [Текст]/ Ю.А. Степанов // Высокие технологии, фундаментальные исследования, экономика. Т.2: сборник статей двенадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург, 2011. – С. 107-108.
27. Степанов, Ю.А. Математическое моделирование разработки угольных пластов [Текст]/ Ю.А. Степанов // Гуманитарные и социальные проблемы обеспечения безопасности горнодобывающих регионов: сб. ст. участников экспертного совещания в рамках XVII Международной специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России. Майнинг – 2010» и I Специализированной выставки «Охрана, безопасность труда и жизнедеятельности». – Новокузнецк, 2011. – С. 26-33.
28. Степанов, Ю.А. О постановке задачи имитационного моделирования геомеханических процессов [Текст]/ Ю.А.Степанов // Высокие технологии, образование, промышленность. Т.1: сборник статей Одиннадцатой международной

- научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологии в промышленности". – Санкт-Петербург, 2011. – С. 129-132.
29. Степанов, Ю.А. Разработка специализированного графического редактора объектов электронных карт для учета физико-механических свойств горных пород [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков // Краевые задачи и математическое моделирование : тематический сборник научных статей: в 3 томах. Т.3. под общ. ред. В.О. Каледина. – Новокузнецк, 2010. – С. 92-97.
30. Степанов, Ю.А. Создание редактора карт [Текст]/ Ю.А. Степанов, В.С. Фанасков // Перспективы развития технологий переработки вторичных ресурсов в Кузбассе: сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием под общ. ред. Ф.И.Иванова, С.А.Шпилова. – Новокузнецк, 2009. – С. 296-300.
31. Степанов, Ю.А. Геоинформационная система в экологии [Текст]/ Ю.А. Степанов, Е.Л. Счастливцев // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-13-2007): Доклады 13-й Международ. научно-практической конферен. – Томск, 2007. – С. 73-76.
32. Степанов, Ю.А. Сеточный генератор [Текст]/ Ю.А.Степанов // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 308-309.
33. Степанов, Ю.А. Компьютерная имитация движения очистного забоя [Текст]/ Ю.А. Степанов, А.В. Степанов, В.Н. Фрянов // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды IV всероссийской научн.-практ. конференции. – Новокузнецк, 2003. – С. 4-5
34. Степанов, Ю.А. Прогнозирование параметров геомеханического взаимодействия механизированных крепей с углепородным массивом [Текст]/ Ю.А. Степанов // Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: Труды VI Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2001. – С. 34-36.
35. Степанов, Ю.А. Исследование влияния режима передвижки секции механизированных крепей на несущую способность непосредственной кровли [Текст]/ Ю.А.Степанов // Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: Труды VI Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2001. – С. 20-21.
36. Степанов, Ю.А. Компьютерное моделирование динамики изменения геомеханических параметров движущегося очистного забоя [Текст]/ Ю.А. Степанов, А.В. Степанов // Перспективные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Труды VIII Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2001. – С. 113-115.
37. Степанов, Ю.А. Подготовка данных при изучении взаимодействия секции механизированной крепи с углепородным массивом методом конечных элементов [Текст]/ Ю.А.Степанов // Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: Труды V Международной конференции. – Новокузнецк, 2000. – С. 167-168.

38. Степанов, Ю.А. Анализ работы механизированного комплекса 4КМ130 в условиях шахты "Алардинская" [Текст]/ Ю.А. Степанов, М.С. Паянок // Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: Труды V Международной конференции. – Новокузнецк, 2000. – С. 76-78.

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

39. Свидетельство № 2000610940, Российская Федерация. Имитационное моделирование работы механизированной крепи КМ138И в очистном забое угольной шахты: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.А. Степанов, В.В. Дмитриев; заявитель и правообладатель СибГИУ, 2000 г.

40. Свидетельство № 2001610645, Российская Федерация. Программа расчета геомеханических параметров для исследования взаимодействия секции механизированной крепи с углепородным массивом: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.А.Степанов, А.В.Степанов, В.Н.Фрянов; заявитель и правообладатель СибГИУ, 2001 г.

41. Свидетельство № 2011614648, Российская Федерация. Специализированный графический редактор объектов электронных карт для учета физико- механических свойств горных пород: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.А.Степанов, В.С.Фанасков; заявитель и правообладатель НФИ КемГУ, 2011 г.

42. Свидетельство № 2011614645, Российская Федерация. Механизированные крепи (Б/Д): свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.А.Степанов, А.В.Степанов, Ю.В.Дмитриев; заявитель и правообладатель НФИ КемГУ, 2011 г.

43. Свидетельство № 2012617895, Российская Федерация. Лексический анализатор предметно-ориентированного языка обработки электронных карт для специализированных ГИС: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.А.Степанов, В.С.Фанасков, А.А.Боярчук; заявитель и правообладатель НФИ КемГУ. 2012 г.

44. Свидетельство № 2012618773. Российская федерация. Компьютерная программа для работы с электронными классификаторами полезных ископаемых применяемых в специализированных ГИС: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю.А.Степанов, В.С.Фанасков; заявитель и правообладатель НФИ КемГУ, 2012 г.

Подписано в печать 26.10.2016 г.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Бумага писчая. Ризография. Уч. изд. л. 2.

Тираж 100 экз.

Заказ \_\_\_\_

НФИКемГУ. 654041, г. Новокузнецк, ул. Циолковского, 23

Типография НФИКемГУ. 654041, г. Новокузнецк, ул. Металлургов, 19,