

УДК 622.271

На правах рукописи

Мусихина Ольга Владимировна

**Технология горно-геометрических расчетов
при проектировании открытой разработки месторождений
с использованием универсальных программных средств**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

25.00.35 – Геоинформатика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2007 г.

Работа выполнена в Уральском государственном горном университете

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Стариков Андрей Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шек Валерий Михайлович
кандидат технических наук,
Поль Валерий Густавович

Ведущая организация - ОАО «Уралгипрошахт»

Защита состоится *5 апреля 2007 г.* в *14.00 ч.* на заседании диссертационного совета Д 004.010.01 при ИГД УрО РАН по адресу: г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГД УрО РАН

Автореферат разослан *5 марта 2007 г.*

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.М.Аленичев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Качество проектирования в значительной степени влияет на темпы технического прогресса. Именно на стадии проектирования в решающей степени предопределяется эффективность горного производства.

Одним из наиболее трудоемких процессов проектирования карьеров являются горно-геометрические расчеты (ГГР), которые выполняются при оценке и подсчете всех видов запасов, обосновании границ и порядка отработки, горно-геометрическом анализе карьерного поля, определении объемов горно-капитальных работ, составлении календарного плана горных работ и пр. Формально доля ГГР в общем горно-технологическом проекте составляет около 45%, на практике же в случае проектирования разработки месторождений со сложными горно-геологическими и горно-технологическими условиями отработки, по трудозатратам и затраченному времени горно-геометрические расчеты могут достигать 70% от всего процесса проектирования. Особенно четко тенденция повышения трудозатрат и времени на выполнение горно-геометрических расчетов проявляется при необходимости исследования нескольких вариантов ведения горных работ.

В современных условиях, на фоне увеличения количества проектируемых карьеров малой и средней производственной мощности, четко прослеживается тенденция сокращения сроков выполнения ГГР при неизменном требовании к высокой достоверности результатов.

Существующая теоретическая база автоматизированных ГГР была разработана преимущественно в 1980-х годах и за последние 20-25 лет не претерпела значительных изменений. Однако широкое распространение компьютерной техники и постоянно модернизируемое программное обеспечение, предоставляющие пользователям новые возможности, предопределило необходимость совершенствования теоретического и методического подходов к решению горно-геометрических задач. В связи с этим разработка компьютерной технологии горно-геометрических расчетов является актуальной исследовательской задачей.

Методология автоматизированных горно-геометрических расчетов основывается на обширной теоретической базе и широком круге исследований таких ученых, как акад. В.В. Ржевский, член-корр. В.Л. Яковлев, доктора наук: В.С. Хохряков, Ю.И. Анистратов, А.И. Арсентьев, В.М. Аленичев, Д.Г. Букейханов, С.В. Корнилков, С.Д. Коробов, Б.А. Симкин, И.Б. Табакман, кандидаты наук: А.Л. Билин, О.В. Наговицин, М.Н. Сивков, А.С. Танайно, Ю.К. Шкута, О.Ю. Яковенко, А.З. Яшкин и др.

Объект исследования. Технология автоматизированного проектирования открытой разработки месторождений.

Предмет исследования. Геоинформационные модели объектов открытых горных работ и алгоритмы горно-геометрических расчетов в составе горно-технологического проекта разработки месторождения.

Цель работы. Разработка компьютерной технологии горно-геометрических расчетов, реализуемой на базе универсальных стандартных и специализированных программных средств.

Идея работы. Идея работы заключается в использовании универсальных программных средств для унификации процесса формализации, хранения и совместного использования пространственно-атрибутивных данных в рамках единой методики автоматизированных горно-геометрических расчетов.

Задачи исследований:

- проанализировать опыт проектирования и программное обеспечение для компьютерного решения горно-геометрических задач применительно к условиям современной российской практики проектирования объектов горного производства;
- разработать методику и алгоритмы автоматизированных горно-геометрических расчетов применительно к различным условиям залегания месторождений полезных ископаемых;
- установить связи между допустимой погрешностью горно-геометрических расчетов и необходимым количеством точек для описания криволинейных контуров, аппроксимирующих горные и геологические объекты;
- обосновать условия применения разработанной компьютерной технологии;
- внедрить компьютерную технологию ГГР в процесс проектирования реальных объектов открытых горных работ и оценить результаты внедрения.

Защищаемые научные положения:

1 Технология моделирования геологических объектов, выбор программных средств и способ подготовки исходных данных определяются условиями залегания месторождения и технологией последующей отработки: для пологопадающих и горизонтальных месторождений целесообразно использовать полигональную систему моделирования, для наклонных и крутопадающих – сплайновую.

2 Контроль и гибкое управление адекватностью геоинформационных моделей геологическим объектам обеспечивается использованием специальных инструментов универсальных программных средств, формирующих модели горно-геометрических объектов.

3 Компьютерная технология горно-геометрических расчетов, основанная на модульном использовании общедоступных программных средств, позволяет осуществлять горно-геометрические расчеты в пределах допустимой погрешности и снизить их трудоемкость на 20 – 30% по сравнению с традиционными методиками.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается привлечением обширного теоретического и практического проектного материала, а также внедрением результатов исследований в процесс проектирования объектов открытых горных работ Российской Федерации. Погрешность результатов ГГР, выполненных по разработанной компьютерной технологии составила до 1,5 % по сравнению с погрешностью результатов расчетов, выполненных по традиционным методикам.

Научная новизна исследований:

- разработана компьютерная технология горно-геометрических расчетов, основанная на модульном синтезе стандартных процедур, выполняемых универсальными программными средствами;
- предложена методика управления погрешностью конечных результатов ГГР посредством регулирования адекватности геоинформационных моделей и выбором программного обеспечения, используемого в модульной компьютерной технологии;
- впервые предложена экспресс-методика определения необходимой и достаточной геоинформационной плотности исходных данных для создания

трехмерных моделей при выполнении автоматизированных горно-геометрических расчетов, обеспечивающая получение результатов ГГР с заданной погрешностью.

Практическая ценность работы. Разработанная компьютерная технология рекомендуется для использования в проектных организациях горного профиля при проектировании карьеров малой и средней производственной мощности.

Разработанная методика ввиду своей гибкости может быть использована в таких разделах горных проектов, как генеральный план, водоотведение, охрана окружающей среды и др. Кроме того, данная методика позволяет осуществлять управление и контроль за выполнением горно-геометрических расчетов и вносить необходимые изменения на любом этапе проектирования.

Предлагаемая методика позволяет сократить: сроки проектирования объектов открытых горных работ малой и средней мощности, трудозатраты на выполнение горно-геометрических расчетов, а также расходы на приобретение и обслуживание программных средств. Разработанная компьютерная технология позволяет повысить гибкость решения горно-технических задач.

Личный вклад автора состоит в:

- разработке модульной компьютерной технологии горно-геометрических расчетов, основанной на использовании общедоступных программных средств;
- установлении зависимостей геоинформационной плотности исходных данных от заданной погрешности выполнения процедуры горно-геометрических расчетов для разных групп месторождений по сложности геологического строения;
- разработке экспресс-методики определения необходимого объема исходных данных для ведения автоматизированных горно-геометрических расчетов;
- обосновании области и условий применения разработанной технологии.

Реализация результатов работы:

- результаты исследований реализованы в 16 проектах открытых горных работ, выполненных Проектно-методическим институтом Научно-производственного объединения Уральского государственного горного университета;
- основные положения разработанной методики внедрены в лабораторные практикумы и курсовое проектирование студентов специальности «Открытые горные работы» по дисциплинам «Информационные технологии», «Планирование открытых горных работ», а также выполнение дипломных проектов.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждены и одобрены на семинарах кафедры РМОС Уральского государственного горного университета, докладывались на Международной научно-технической конференции по итогам и проблемам производства, науки и образования в сфере добычи полезных ископаемых открытым способом (г. Екатеринбург, 2002), научно-практических конференциях «Уральской горно-промышленной декады» (г. Екатеринбург, Уральский государственный горный университет, 2004-2006 гг).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 9 работ.

Объем и структура работы:

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 19 таблиц, библиографию из 104 наименований, 3 приложения.

Автор выражает глубокую благодарность за оказанную методическую помощь при работе над диссертацией д.т.н., проф. С.В. Корнилку, д.т.н., проф. Ю.И. Лелю, д.т.н., проф. В.М.Аленичеву, а также считает своим долгом выразить искреннюю признательность к.т.н., доц. С.В.Исакову за многолетнее творческое сотрудничество и практическую помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Горно-геометрические расчеты являются одним из наиболее трудоемких процессов проектирования объектов открытой разработки, требующих высокой достоверности результатов.

Снизить трудоемкость ГГР можно использованием в процессе проектирования современных компьютерных технологий, реализованных в профессиональных интегрированных системах горного профиля. Наряду с неоспоримыми достоинствами данное программное обеспечение, разработанное преимущественно зарубежными компаниями, имеет и ряд недостатков, среди которых: высокая стоимость как самого программного продукта, так и его эксплуатации, повышенные требования к качеству технической базы и уровню подготовки пользователей. Кроме того, интегрированные системы не в состоянии охватить весь спектр горно-технических задач проекта. Как следствие, разработчики программного обеспечения вынуждены закрывать пробелы в системах отдельными разработками в виде так называемых «планировщиков». Примерами подобного программного обеспечения являются *NPV Sheduler* и *Whittle*. Указанные программные средства, являются, по сути, модификацией программ экономического обоснования границ разработки методом Лерча-Гроссмана. С их помощью можно определять экономически рациональные границы отработки, но без учета нормативных требований в области безопасности, правил охраны недр и т.п.

Альтернативным решением проблемы автоматизации ГГР, учитывающим нормативные требования, может стать компьютерная технология, основанная на модульном синтезе общедоступных программных пакетов, ориентированных на определенный класс задач. Такие программные средства, по сути, являются локальными автоматизированными системами, которые могут работать самостоятельно либо входить в интегрированные системы более высокого уровня.

Компьютерная технология ГГР должна основываться на существующих методиках, отвечающих условиям отечественной практики

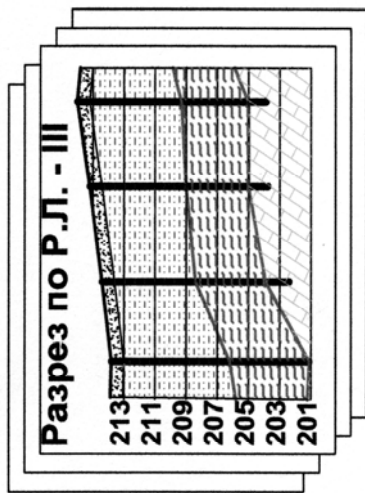
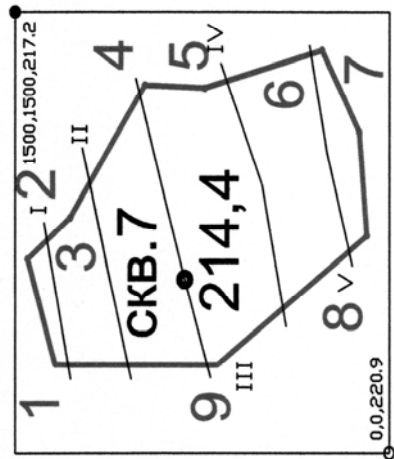
проектирования отработки месторождений. При этом результаты горно-геометрических расчетов должны иметь погрешность, сопоставимую с погрешностью исходных данных, а программное обеспечение должно быть доступным как по цене, так и по уровню подготовки большинства пользователей. Кроме того, должны быть сокращены время и трудозатраты на выполнение ГГР.

Наибольшую долю по трудоемкости и временным затратам в процесс автоматизированных ГГР вносит этап создания моделей месторождений и горных выработок, на основе которых выполняются ГГР.

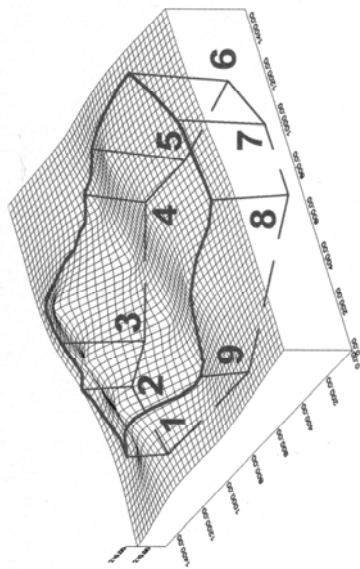
1 Технология моделирования геологических объектов, выбор программных средств и способ подготовки исходных данных определяются условиями залегания месторождения и технологией последующей отработки: для пологопадающих и горизонтальных месторождений целесообразно использовать полигональную систему моделирования, для наклонных и крутопадающих – сплайновую.

В профессиональных интегрированных системах горного профиля преимущественно используется только один способ моделирования месторождений – полигональный, при котором трехмерные объекты рассматриваются как группы замкнутых многоугольников. В общедоступных программных средствах при описании нерегулярных объектов, к которым относятся геологические объекты, часто используется еще один способ моделирования – сплайновый. Тем не менее, установлено, что наиболее точно с помощью полигонального моделирования создаются не трехмерные объекты, а модели поверхностей. Поэтому данный способ моделирования является оптимальным для создания моделей месторождений, которые можно представить в виде набора 3D-поверхностей, то есть для горизонтальных и пологопадающих месторождений полезных ископаемых. Частным случаем полигонального моделирования является моделирование поверхностей регулярными GRID-сетями (рисунок 1). GRID-сеть формируется генерацией регулярной сетки (координат узлов сети) из массива точек, случайным образом описывающих гипсометрическую поверхность.

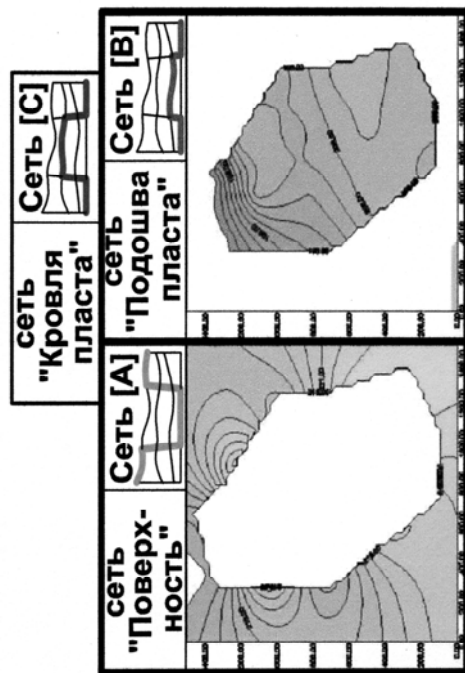
1 этап: обработка исходных данных



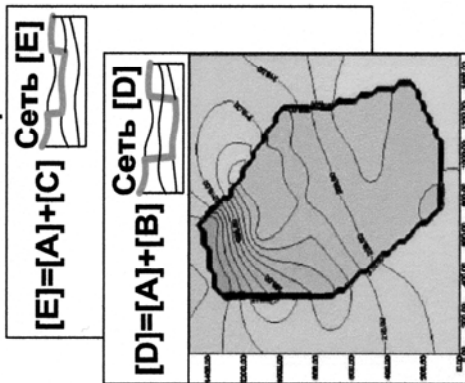
2 этап: 3D-моделирование рельефа МПИ и карьерной выемки (сеть [R])



3 этап: формирование полигональных областей в смоделированных сетях



4 этап: формирование результирующих сетей по ПИ и вскрывше



5 этап: подсчет объемов между 2 сетями

$$V_k = [R] - [D] \quad \text{объем карьера в конечном контуре}$$

$$V_v = [R] - [E] \quad \text{объем вскрывши в конечном контуре}$$

6 этап: ПЛАНИРОВАНИЕ ЭТАПОВ ОТРАБОТКИ КАРЬЕРНОГО ПОЛЯ

Рисунок 1 – Формирование полигональной модели месторождения и карьера, а также ГТР на их основе

При моделировании месторождения поверхностями исходные данные о залежи полезного ископаемого должны быть представлены в виде базы данных, в которую входят координаты устьев геологических скважин (X , Y , Z), данные о мощности покрывающих пород и полезной толщи, различные характеристики объекта. Такой вид данных, как правило, и предоставляется проектировщикам в случае проектирования горизонтальных и пологопадающих залежей (рисунок 1, этап 1).

На основе базы исходных данных формируется набор трехмерных поверхностей рельефа месторождения, кровли и почвы пласта полезного ископаемого (рисунок 1, этапы 2,3,4), на которые наносятся контуры будущей горной выработки. Суммирование и вычитание объемов, заключенных между поверхностями в контурах отработки, приводит к получению численных значений объемов полезного ископаемого и вскрыши (мощности покрывающей толщи) в границах отработки (рисунок 1, этапы 5,6).

При проектировании наклонных и крутопадающих залежей, исходные данные преимущественно содержатся в виде набора геологических сечений и планов выходов руд на отдельные горизонты. В связи с этим моделирование месторождения трехмерными поверхностями затруднено. В этом случае рационально использовать сплайновую систему моделирования.

Сплайновая система моделирования поддерживает такой тип моделей, как твердотельные модели, или *SOLID*-объекты. *SOLID*-объект содержит информацию об объеме моделируемого объекта, его пространственном положении и форме, что идентично подходу к блочным моделям в профессиональных интегрированных системах (рисунок 2).

Для создания трехмерной твердотельной модели рудного тела и вмещающего его участка недр необходимо сформировать базу данных в виде набора плоских замкнутых контуров, дискретно описывающих моделируемые объекты. Твердотельная модель формируется посредством сплайн-переходов (методом «лофтинга») между контурами, размещенными в пространстве в соответствии с системой координат месторождения.

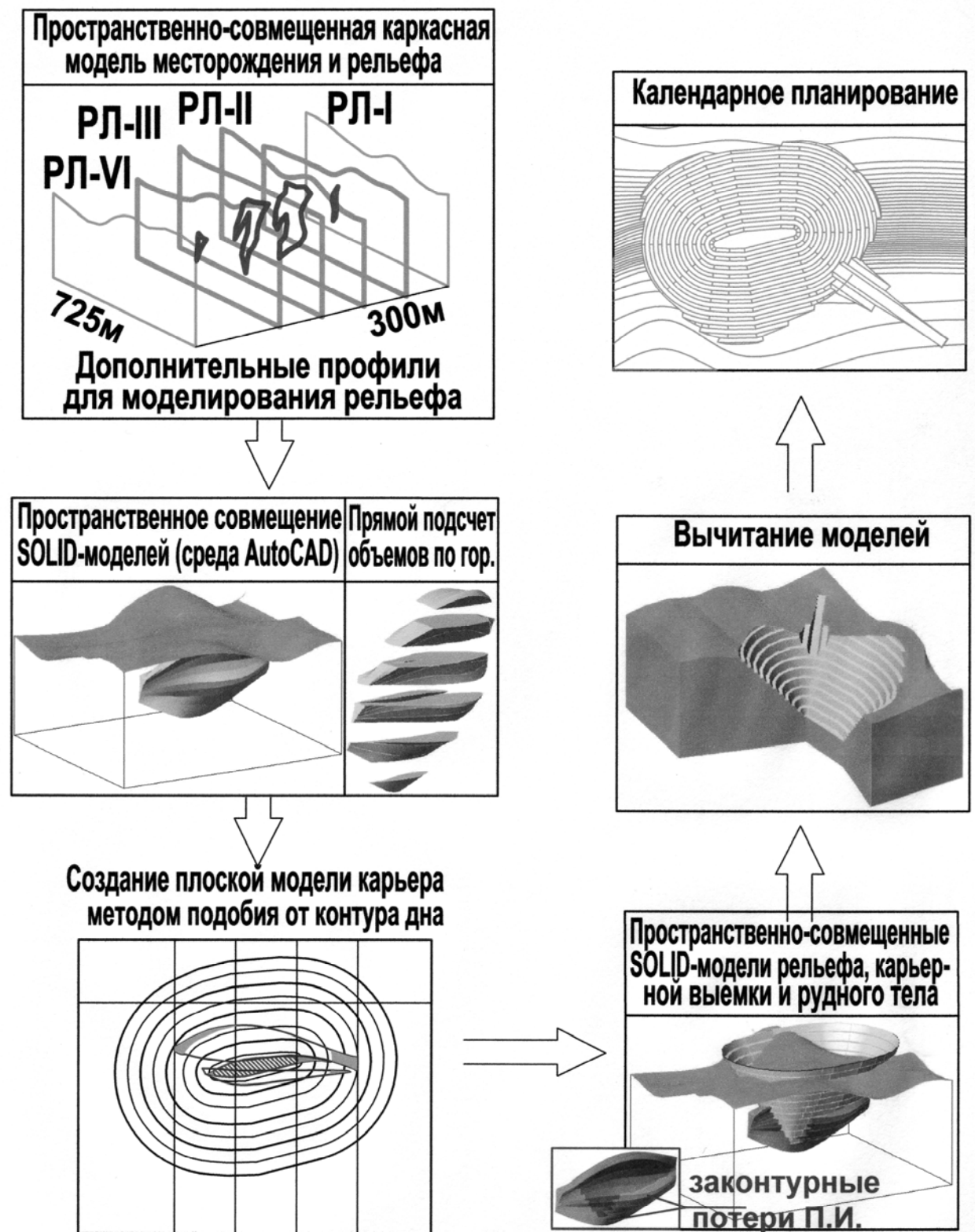


Рисунок 2 – Последовательность формирования твердотельных моделей рельефа, рудного тела и карьера

На основе анализа рынка программного обеспечения, позволяющего оперативно решать задачи горно-геометрической оценки месторождения, в диссертационной работе предложено использование нескольких общедоступных по стоимости, требованиям к технической базе и уровню подготовки пользователей программных пакетов. В этих программах

рационально организована работа с графической и табличной документацией. Полигональное моделирование поддерживается в программном пакете *Surfer*, сплайновое твердотельное – в *Mechanical DeskTop*. Комбинацию полигонального и твердотельного моделирования рекомендуется производить в *Mechanical DeskTop* и *AutoCADD Survey*.

Таким образом, на автоматизированное создание моделей месторождений уделяется 10...20% трудоемкости проекта. При этом для моделирования разных типов месторождений по условиям залегания требуется разное количество времени и трудозатрат. Наибольший процент трудозатрат приходится на моделирование наклонных и крутопадающих месторождений, особенно если рудные тела различаются показателями качества и сортности.

Для построения моделей предельных границ карьера и горных работ, учитывающих максимальное извлечение полезного ископаемого, необходимо иметь набор погоризонтных геологических планов выходов руд, сформированных в единой системе координат (рисунок 3). При этом для формирования модели карьерной выемки не имеет значения то, в какой системе моделирования были разработаны модели месторождения, так как геологические планы представляются в виде плоских многоугольников, дискретно описывающих границы залежи на горизонте, а не в виде трехмерных моделей.



Рисунок 3 – Послойная модель месторождения

Отличительной особенностью ГГР является необходимость учета динамики развития карьерного пространства и фронтов горных работ. Учесть динамику горных работ возможно с помощью постоянного обновления модели карьерного пространства на основе принципа подобия и

параллельного переноса контуров разработки (рисунок 4). Неравномерность отработки карьерного поля по этапам ведения работ достигается за счет выделения опорных горизонтов, для которых задаются разные значения скорости подвигания горных работ.

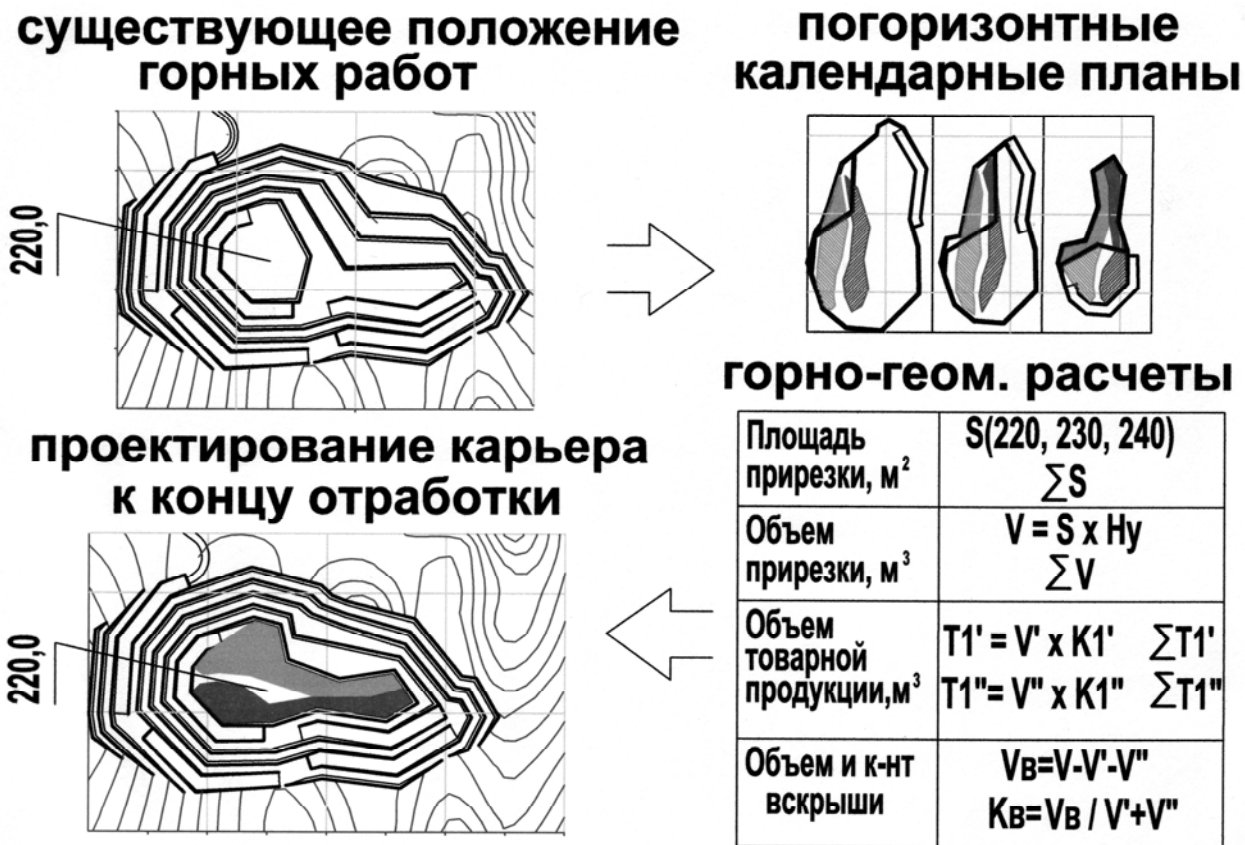


Рисунок 4 – ГТР в процессе календарного планирования

2 Контроль и гибкое управление адекватностью геоинформационных моделей геологическим объектам обеспечивается использованием специальных инструментов универсальных программных средств, формирующих модели горно-геометрических объектов.

Адекватность модели (adequacy of a model) – качественная характеристика степени подобия модели ее реальному прототипу, но не в целом, а по тем свойствам модели, которые для исследования считаются существенными. Визуализация модели является первым источником информации об адекватности модели, так как проектировщик в первую очередь оценивает и анализирует пространственное представление моделью моделируемого объекта, пиковые выпадения модели рудного тела, а количественную оценку погрешности осуществляет позже, если модель и объект визуально подобны друг другу. В случае неполного совпадения

модели и объекта, модель можно довести до большего соответствия посредством добавления в базовый вариант модели уточняющих дополнений или же посредством использования иных методов интерполяции поверхностей модели.

Все компьютерные модели, используемые при горно-геометрических расчетах в разработанной компьютерной технологии, характеризуются управляемой адекватностью, то есть возможностью калибровки модели.

При использовании *GRID*-сетей управление адекватностью моделей связано с возможностью подбора оптимальных параметров структурных единиц – ячеек *GRID*-сетей и возможностью выбора метода интерполяции геологической информации между реальными распределенными по месторождению исходными геологическими данными.

Для определения рациональных размеров ячеек *GRID*-сетей было проведено исследование для участка естественного рельефа размерами в плане 1500×1500 м и с перепадом отметок по (Z) 225,3 – 212,5 м, то есть $\Delta Z = 12,8$ м. Для исследуемого участка была смоделирована серия трехмерных поверхностей с разными параметрами ячеек сети (рисунок 5). Далее по каждой созданной сети были определены отклонения от исходных пикетов (dZ).

По значению относительной погрешности ($E = dZ / \Delta Z$) и установленным пороговым значениям (10% – для предпроектных расчетов, 3-5% – для долгосрочного планирования и проектирования, менее 3% – для годового и текущего планирования) были определены соответствующие рациональные размеры ячеек сети (рисунок 6).

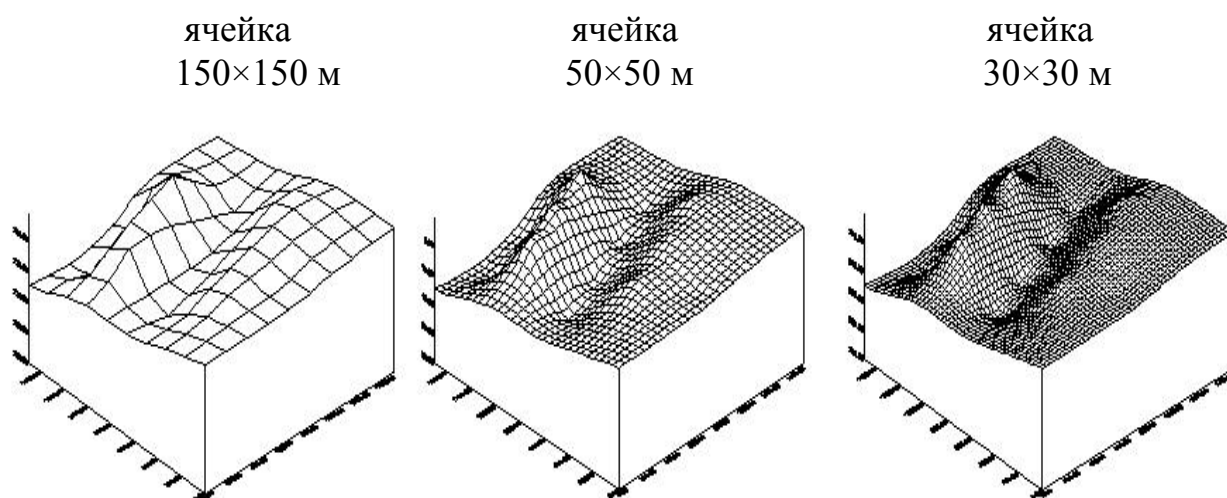


Рисунок 5 – Изменение модели поверхности в зависимости от размеров ячеек сети

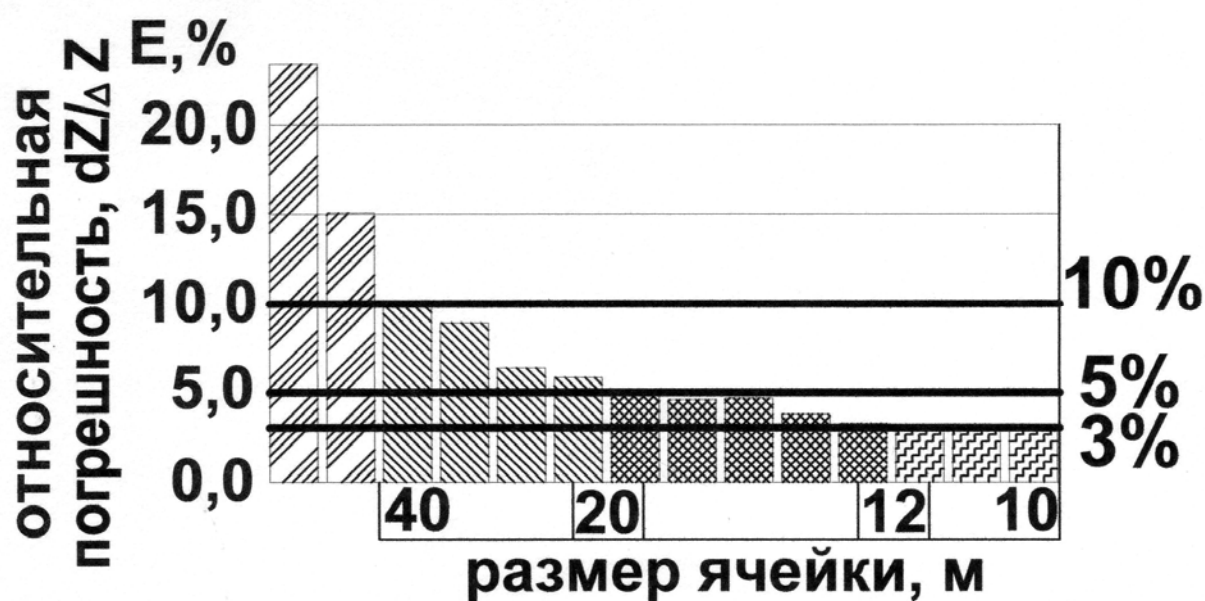
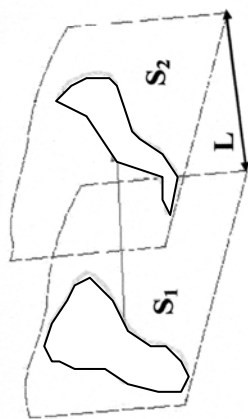


Рисунок 6 – Диаграмма распределения рациональных размеров ячеек сети по допустимым значениям погрешностей

Так для достижения требуемой погрешности не более 3% относительный размер ячеек сети должен быть 0,67–0,77% (абсолютный размер ячеек для участка 1500×1500 м – 10...12 м). Для достижения требуемой погрешности в пределах 3–5% относительный размер ячеек сети 0,83–1,25% (абсолютный размер для участка 1500×1500 м – 12...20 м). Пороговое значение погрешности 5–10% редко удовлетворяет требуемой точности ГГР, хотя для него абсолютный размер ячеек будет составлять 20...40 м. Ячейки сети более 40 м для данного участка не обеспечивают порог погрешности 10%.

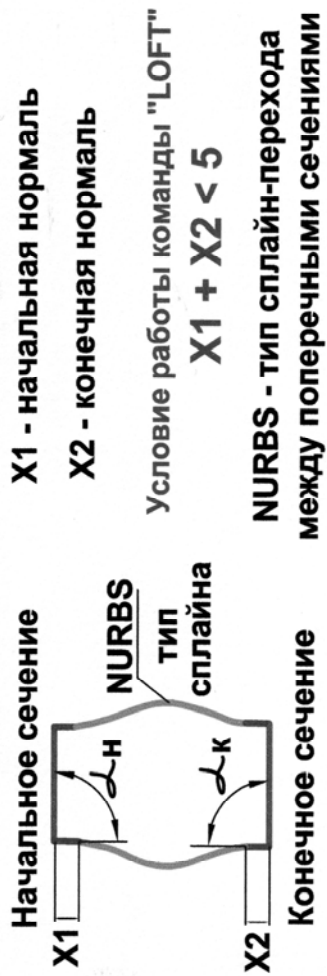
При формировании модели месторождения на основе сплайновых твердотельных объектов установлено, что управление адекватностью характеризуется типом сплайн-перехода между базовыми профилями (геологическими сечениями месторождения) и изменением параметров начальной и конечной нормалей сплайн-переходов (рисунок 7). Изменение формы блока, а следовательно и его объема, происходит между поперечными сечениями (геологическими разрезами) залежи без искажения реальных геологических условий.

В результате исследований, выполненных для геологического блока с объемом $251171,3 \text{ м}^3$, расстоянием 100 м между смежными сечениями и площадью одного сечения $4313,4 \text{ м}^2$, а второго – $1071,7 \text{ м}^2$ были установлены зависимости между соотношением параметров начальной (X1) и конечной (X2) нормалей сплайн-переходов и погрешностью горно-геометрических расчетов.



$$V = \frac{S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2}}{3} L$$

Регулирование объема блока при создании его методом "лофтинга"



Примеры изменения формы блока посредством управления параметрами начальной и конечной нормали

$X1 = 0,5$ $X2 = 4,0$		$X1 = 1,0$ $X2 = 3,5$		$X1 = 1,5$ $X2 = 3,0$		$X1 = 2,0$ $X2 = 2,5$	
$X1 = 2,5$ $X2 = 2,0$		$X1 = 3,0$ $X2 = 1,5$		$X1 = 3,5$ $X2 = 1,0$		$X1 = 4,0$ $X2 = 1,5$	

Изменение погрешности ГТР от параметров конечной и начальной нормали

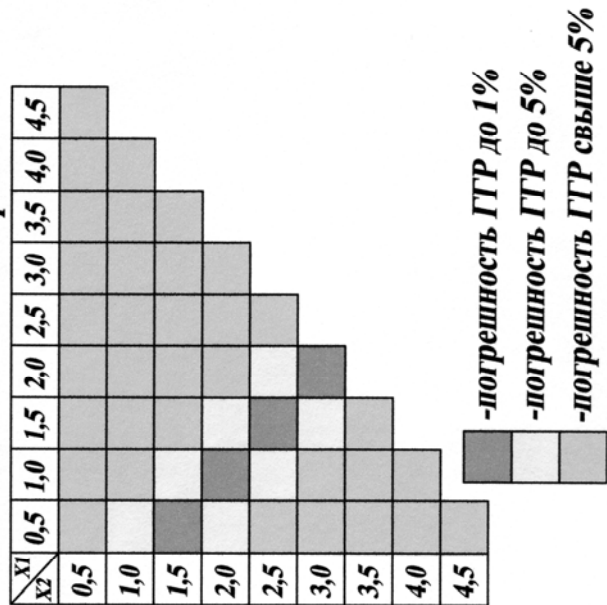


Рисунок 7 – Управление адекватностью твердотельных моделей

Доказано, что изменением параметров начальной и конечной нормалей сплайн-переходов возможно добиться такой формы трехмерного блока, при котором погрешность ГГР не будет превышать допустимых значений.

Погрешность модели является количественным показателем степени расхождения результатов моделирования с реальным объектом. В диссертационной работе оценка погрешности моделей, созданных с использованием разработанных компьютерных технологий, осуществлялась посредством сравнения результатов моделирования с результатами подсчета запасов месторождений, утвержденных ГКЗ. Средняя погрешность моделей разных месторождений не превысила 1,0%, что позволяет использовать данные модели в дальнейших горно-геометрических расчетах.

3 Компьютерная технология горно-геометрических расчетов, основанная на модульном использовании общедоступных программных средств, позволяет осуществлять горно-геометрические расчеты в пределах допустимой погрешности и снизить их трудоемкость на 20 – 30% по сравнению с традиционными методиками.

На основе проведенных исследований была разработана компьютерная технология горно-геометрических расчетов, основанная на модульном использовании общедоступных программных средств (рисунок 8). Компьютерная технология в общем виде состоит из шести основных стадий: 1 – анализ исходных данных, выбор программного обеспечения; 2 – формализация исходных данных под выбранное ПО; 3 – создание геоинформационных моделей месторождения и горных выработок; 4 – оценка погрешности моделей; 5 – выполнение горно-геометрических расчетов; 6 – оценка результатов ГГР.

Погрешность результатов горно-геометрических расчетов, выполняемых по разработанной компьютерной технологии, напрямую зависит от геоинформационной плотности исходных данных.

Проблема количественной оценки необходимой и достаточной геоинформационной плотности исходных данных возникает на втором этапе разработанной компьютерной технологии – «формализации исходных данных под выбранное программное обеспечение». Низкая геоинформационная плотность отрицательно сказывается на точности горно-геометрических расчетов, а высокая – на скорости и трудоемкости процессов подготовки исходных данных и выполнения ГГР.

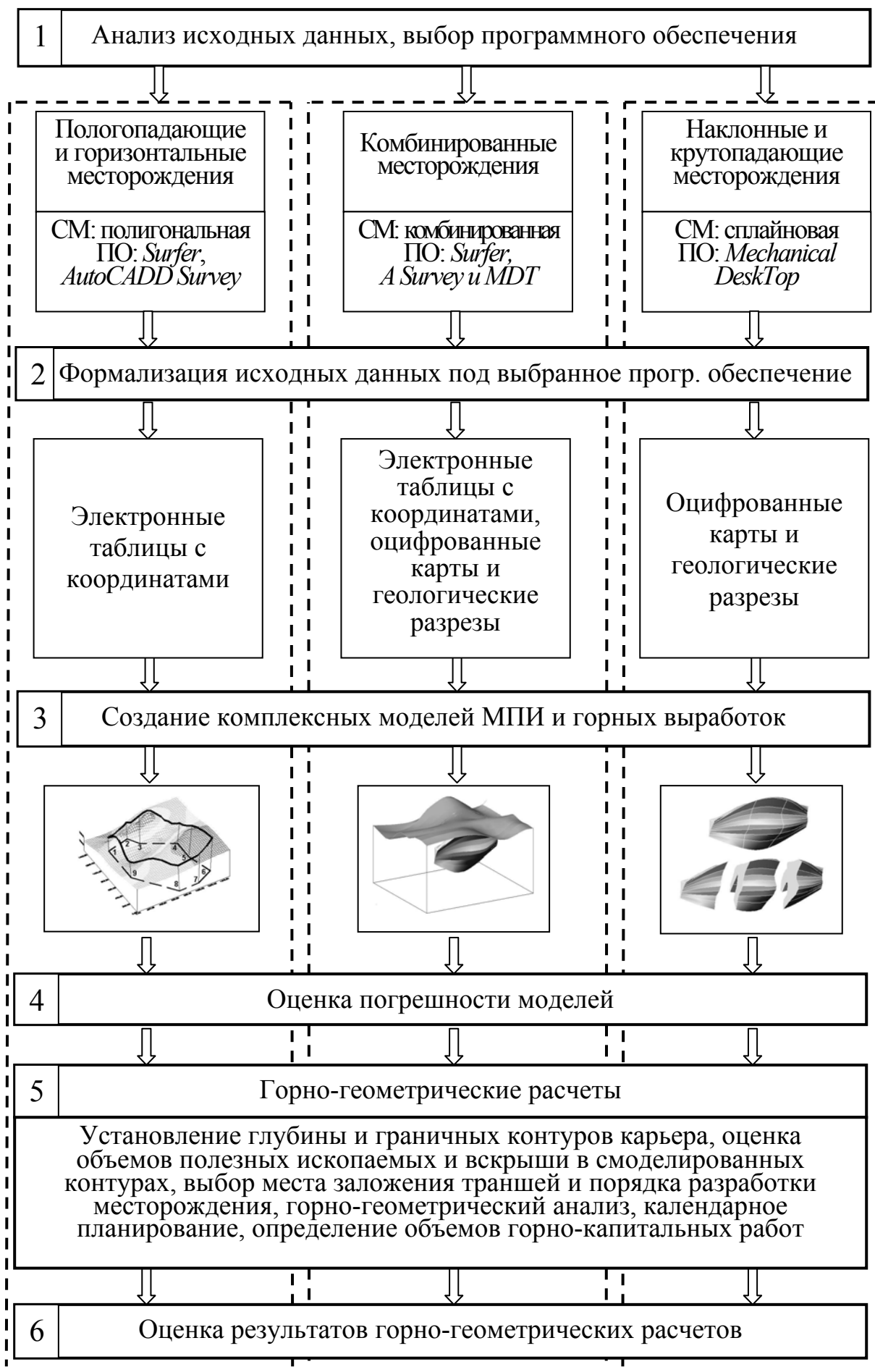


Рисунок 8 – Общая схема компьютерной технологии выполнения ГГР

Ранее вопросами оценки геоинформационной плотности занимались такие ученые, как В.М. Аленичев, В.И. Суханов, В.С. Хохряков, Е.В. Ригин и др. В их исследованиях рациональное значение геоинформационной плотности определялось для двумерных криволинейных контуров. При объемном моделировании появляется необходимость определения необходимой и достаточной величины геоинформационной плотности для трехмерного моделирования и горно-геометрических расчетов на их основе.

Оценка рационального значения геоинформационной плотности производилась для четырех групп месторождений по условиям залегания, соответствующих «Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» (утв. приказом МПР РФ от 07.03.97 №40 в соответствии с постановлением Правительства РФ №210 от 28.02.96). Для каждой группы сложности геологического строения МПИ были выделены по 4 реальных месторождения, соответствующих классификационным признакам группы. Далее замкнутые контуры, описывающие рудные тела или пласты полезных ископаемых, были векторизованы таким образом, чтобы новый векторный контур максимально близко повторил исходную конфигурацию. Затем фиксировались длина, площадь контура и количество точек, потребовавшихся для его описания.

На основе группы замкнутых контуров, дискретно описывающих месторождение, осуществлялось трехмерное моделирование, после чего с использованием трехмерных моделей осуществлялись ГГР в целом по всему месторождению, а результаты сравнивались с объемами полезных ископаемых, утвержденных ГКЗ (ТКЗ). При неудовлетворительном значении погрешности результатов ГГР, количество точек на исходных контурах увеличивалось, трехмерная модель на их основе обновлялась, в следствие чего погрешность результатов снижалась.

Результаты оценки рациональных значений геоинформационной плотности исходных данных в зависимости от заданного значения допустимой погрешности горно-геометрических расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка геоинформационной плотности криволинейных контуров для разных групп МПИ по сложности геологического строения

Группа сложности геологического строения МПИ	Порог допустимой погрешности ведения ГГР – Δ , %	Геоинформационная плотность криволинейного контура – P_K , 1/м	Необходимое для описания количество точек, N_K , ед.
1-ая группа	$\leq 1\%$	0,082	50-60
	1-3%	0,054	30-50
	$\geq 3\%$	0,025	15-30
2-ая группа	$\leq 1\%$	0,107	120-140
	1-3%	0,079	80-120
	$\geq 3\%$	0,052	40-80
3-я группа	$\leq 1\%$	0,391	150-170
	1-3%	0,294	100-150
	$\geq 3\%$	0,196	60-100
4-ая группа	$\leq 1\%$	1,463	250-300
	1-3%	1,084	180-250
	$\geq 3\%$	0,650	120-180

Как видно таблицы 1, количество точек, описывающих криволинейный контур, возрастает при усложнении геологического строения, а также при повышении требований к допустимой погрешности горно-геометрических расчетов. С данными из таблицы 1 была проведена статистическая обработка и получены корреляционные зависимости необходимого количества точек для описания криволинейного контура и геоинформационной плотности от допустимой погрешности результатов ГГР в диапазоне от 0,5 до 4%, представленные в таблице 2.

На основе полученных зависимостей в диссертации разработана экспресс–методика оценки необходимого количества исходных данных для автоматизированных ГГР с заданной погрешностью для различных по геологической сложности типов месторождений. Экспресс-методика позволяет определить необходимое количество точек для описания криволинейных контуров подстановкой значения допустимой погрешности в зависимости, представленные в таблице 1, или по номограмме, приведенной на рисунке 9.

Таблица 2 – Корреляционные зависимости геоинформационной плотности от допустимой погрешности результатов ГГР

Группа сложности ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МПИ	ЗАВИСИМОСТИ	КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ
1-ая группа	$N_k = 61,3 - 10,32 \cdot \Delta$	0,986
	$P_k = 0,087 - 0,017 \cdot \Delta$	0,990
2-ая группа	$N_k = 147,143 - 22,7 \cdot \Delta$	0,966
	$P_k = 0,115 - 0,016 \cdot \Delta$	0,972
3-я группа	$N_k = 178,9 - 25,8 \cdot \Delta$	0,971
	$P_k = 0,42 - 0,06 \cdot \Delta$	0,972
4-ая группа	$N_k = 304,1 - 40,8 \cdot \Delta$	0,976
	$P_k = 1,59 - 0,24 \cdot \Delta$	0,970

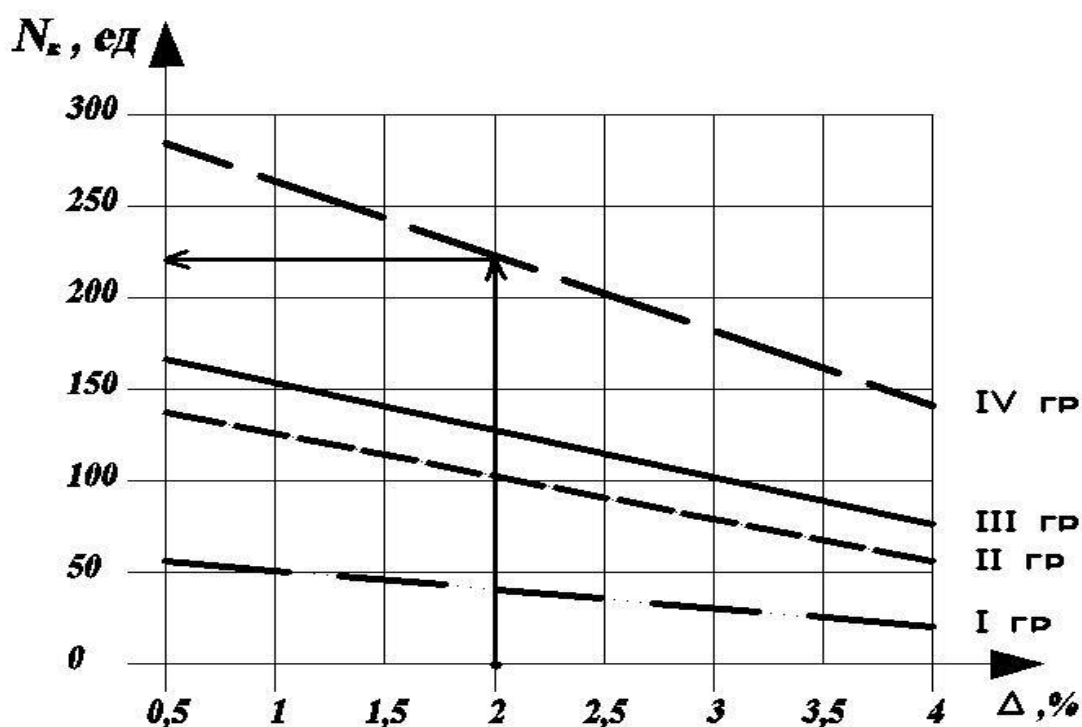
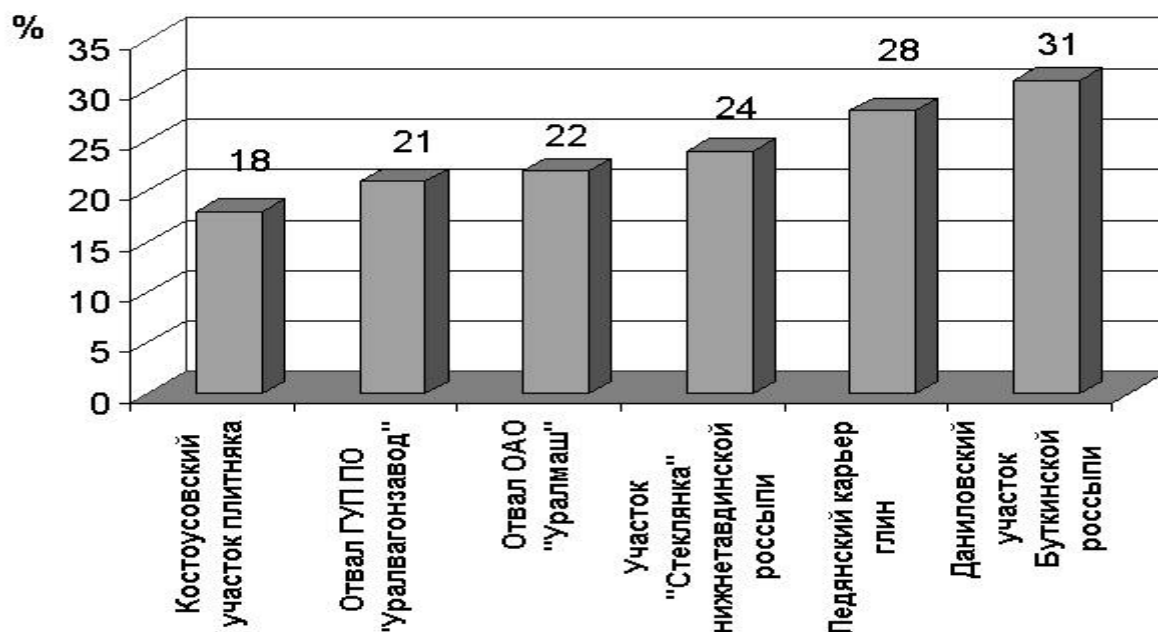


Рисунок 9 – Номограмма необходимого количества точек для описания контура от допустимой погрешности ГГР

Внедрение разработанной компьютерной технологии горно-геометрических расчетов в процесс проектирования объектов открытых горных работ (рисунок 10) привело к снижению среднего показателя трудоемкости ГГР с 45–70% по сравнению с традиционными методиками до 18–31% (для пологопадающих и горизонтальных месторождений) и 37–51% (для наклонных и крутопадающих).

Пологопадающие и горизонтальные МПИ



Наклонные и крутопадающие МПИ

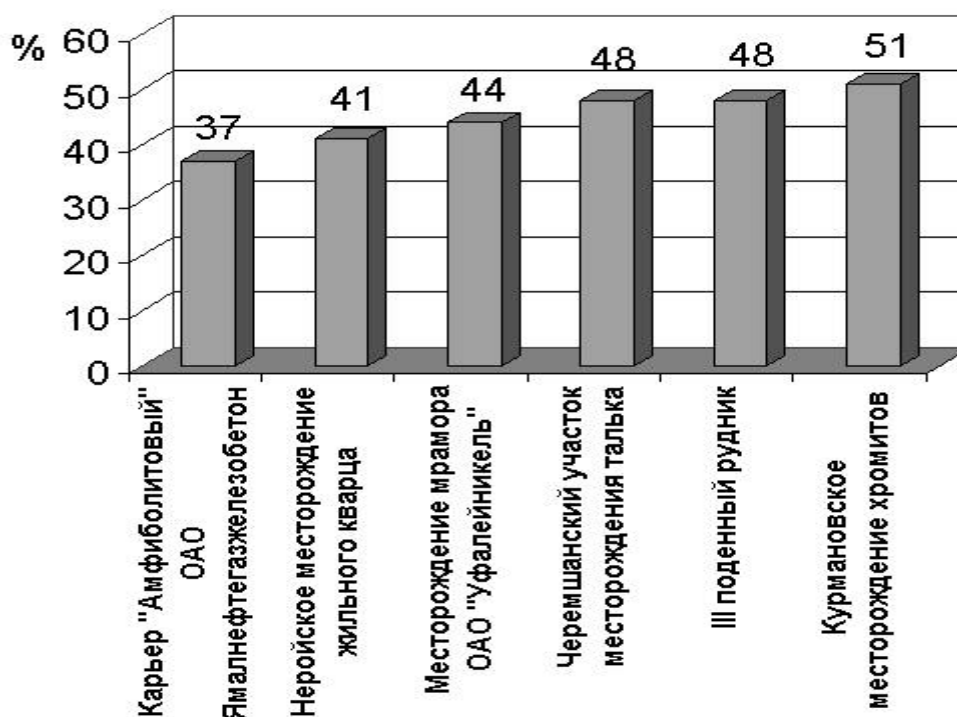


Рисунок 10 – Доля автоматизированных ГТР в составе горно-технологического проекта

Сокращение времени и трудозатрат на выполнение горно-геометрических расчетов было осуществлено в данной компьютерной технологии за счет следующих процедур и мероприятий:

1 Разделение на 1-м этапе всех месторождений на три группы по условиям залегания (рисунок 8). Использование разных систем моделирования и возможность выбора программного обеспечения под

конкретные геологические и горнотехнические условия позволили применять для моделирования тот вид исходных данных, который предоставляется проектировщикам. При выполнении ГГР по традиционным методикам или с использованием интегрированных программных средств горного профиля любые исходные данные первоначально должны быть преобразованы в формат, единственно возможный для всех типов месторождения, что составляет 5 – 25% от трудоемкости исполнения всего горно-технологического проекта.

2 Формирование комплексных пространственно совмещенных моделей геологических объектов и горных выработок в единой системе координат позволяет выполнять любое количество горно-геометрических расчетов, используя одну базу данных, а не множество, как это принято в традиционных методиках ГГР. Кроме того, единая база данных в виде комплексной модели исключает необходимость создания сложной структуры исходных данных, так как вся информация для ГГР содержится в одном файле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-практической задачи – разработке компьютерной технологии горно-геометрических расчетов при проектировании открытой разработки месторождений.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1 На основе анализа опыта проектирования и программного обеспечения для моделирования горно-геологических объектов и последующего компьютерного решения горно-геометрических задач установлено, что технология моделирования геологических объектов, выбор программных средств и способ подготовки исходных данных определяются условиями залегания месторождения и технологией последующей отработки: для горизонтальных и пологопадающих месторождений рекомендуется полигональная система моделирования, реализованная в программном пакете Surfer, для крутопадающих месторождений – сплайновая система, реализованная в среде Autodesk Mechanical Desktop.

2 Разработаны компьютерные технологии горно-геометрических расчетов, основанные на модульном синтезе универсальных программных

средств, которые позволяют осуществлять ГГР в пределах допустимой погрешности и снизить их трудоемкость на 20–30% по сравнению с традиционными методиками.

3 В рамках предложенной технологии разработана методика гибкого управления адекватностью геоинформационных моделей геологическим объектам, основанная на специальных инструментах универсальных программных средств, формирующих модели горно-геометрических объектов.

4 Разработана экспресс-методика определения необходимой и достаточной геоинформационной плотности исходных данных для создания трехмерных моделей при выполнении автоматизированных горно-геометрических расчетов, обеспечивающая получение результатов ГГР с заданной погрешностью.

5 Результаты исследований реализованы в 16 проектах открытых горных работ, выполненных Проектно-методическим институтом Научно-производственного объединения Уральского государственного горного университета.

Фрагменты разработанной методики внедрены в лабораторные практикумы и курсовое проектирование студентов специальности «Открытые горные работы» по дисциплинам «Информационные технологии», «Планирование открытых горных работ», а также выполнение дипломных проектов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статья, опубликованная в ведущем рецензируемом научном журнале, входящем в перечень ВАК:

1 Стариков А.Д. Компьютерная генерация погоризонтных геологических планов из геолого-литологических разрезов при проектировании открытых горных работ [Текст] / А.Д. Стариков, О.В. Мусихина // Известия ВУЗов. Горный журнал.- 2002. - №4. – С. 15 – 18.

Статьи, опубликованные в научных сборниках, журналах и материалах конференций:

2 Мусихина О.В. Сеточные технологии компьютерного моделирования месторождений и проектирования карьеров [Текст] / О.В. Мусихина // Итоги и проблемы производства, науки и образования в сфере добычи полезных

ископаемых открытым способом: материалы международной научно-технической конференции / УГГГА. – Екатеринбург, 2002. – С. 240 – 245.

3 Мусихина О.В. Оценка доли автоматизированных ГГР в процессе проектирования объектов ОГР [Текст] / О.В. Мусихина // Материалы уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 5 – 15 апреля 2004 г. / УГГГА. – Екатеринбург, 2004. – С. 231 – 235.

4 Мусихина О.В. Оценка точности горно-геометрических расчетов при использовании компьютерных технологий [Текст] / О.В. Мусихина // Материалы Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 4-14 апреля 2005 г. / УГГУ. – Екатеринбург, 2005. – С. 141– 142.

5 Мусихина О.В. Рациональное значение геоинформационной плотности исходных данных для ведения горно-геометрических расчетов при проектировании объектов ОГР [Текст] / О.В. Мусихина, Л.Л. Царегородцев // Материалы Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 3 – 13 апреля 2006 г. / УГГУ. – Екатеринбург, 2006. – С. 48 – 49.

6 Стариков А.Д. GRID-технологии в горно-геометрических расчетах [Текст] / А.Д. Стариков, О.В. Мусихина, С.В. Исаков // Введение в геоинформатику горного производства: учебное пособие / под ред. В.С. Хохрякова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001. С. 151 – 155.

7 Стариков А.Д. Проведение горно-геометрических расчетов с использованием гипсометрической модели и GRID-технологий [Текст] / А.Д. Стариков, О.В. Мусихина // Известия УГГГА. Сер.: Горное дело. – 2002. - №3. – с. 151 – 155.

8 Стариков А.Д. Компьютерные технологии в проектировании и планировании открытых горных работ [Текст] / А.Д. Стариков, О.В. Мусихина // Итоги и проблемы производства, науки и образования в сфере добычи полезных ископаемых открытым способом: материалы международной научно-технической конференции / УГГГА. – Екатеринбург, 2002. – С. 222 – 224.

9 Стариков А.Д. Использование сеточных технологий при проведении горно-геометрических расчетов для горизонтальных и пологопадающих месторождений со сложной гипсометрией пласта [Текст] / Стариков А.Д., С.В. Исаков, О.В. Мусихина // Известия УГГУ. Сер.: Горное дело. – 2005. - №21. – С. 115 – 121.

Мусихина Ольга Владимировна

**ТЕХНОЛОГИЯ ГОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

Автореферат

Подписано в печать 28.02.07. Бумага писчая

Формат 60x84¹/₁₆. Печ. л. 1. Тираж 100

Заказ №

Издательство УГГУ
620144 г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30