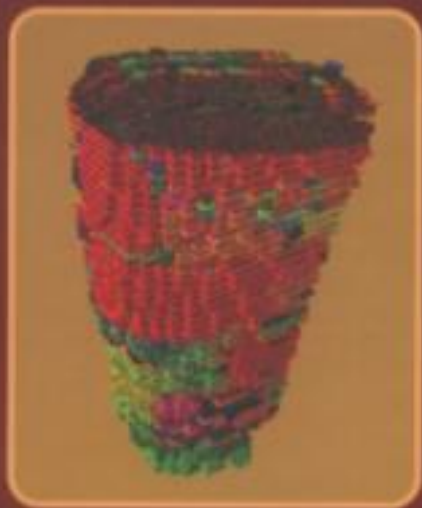




**В.Ф. Колганов
И.Ф. Бондаренко
А.Ю. Давыденко
П.В. Васильев**

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**при разведке и оптимизации
разработки
месторождений алмазов**



НОВОСИБИРСК
«НАУКА»



**V.F.Kolganov
I.F.Bondarenko
A.Y.Davydenko,
P.V.Vasiliev**

**COMPUTER
SIMULATION
During exploration
and optimization of
diamond deposit's development**

**NOVOSIBIRSK
“NAUKA”
2008**



**В.Ф. Колганов,
И.Ф. Бондаренко,
А.Ю. Давыденко,
П.В. Васильев**

**КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
при разведке и оптимизации
разработки
месторождений алмазов**

**НОВОСИБИРСК
“НАУКА”
2008**

УДК 550.8.053:519

ББК 33.346

К 60

Колганов В.Ф. Компьютерное моделирование при разведке и оптимизация разработки месторождений алмазов. /В.Ф.Колганов, И.Ф.Бондаренко, А.Ю.Давыденко, П.В.Васильев. -Новосибирск: Наука, 2008. – 262с., [2,6] л. вкл.

ISBN 978-5-02-023208-2

В монографии рассмотрено современное состояние теории и практики компьютерного моделирования месторождений полезных ископаемых. Описаны методы, используемым при разведке, геолого-экономической оценке, проектировании и разработке месторождений алмазов. Приведены данные о геологии кимберлитовых месторождений, физико-механических свойствах слагающих их пород и технологии отработки запасов. Изложены вопросы оптимизации сети разведочных скважин и границ карьеров по максимуму прибыли для ряда эксплуатируемых алмазоносных трубок. Проиллюстрировано большое число примеров построенных комплексных моделей месторождений.

Книга предназначена для геологов, маркшейдеров и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами моделирования, оптимизации и горно-промышленной оценки месторождений полезных ископаемых. Может быть полезна студентам и аспирантам горно-геологических и горно-металлургических специальностей.

Табл. 32, Ил. 147, Библиогр.: 134 назв.

Рецензенты

доктор технических наук *В.И.Клишин*
кандидат технических наук *А.Н.Акишев*

Утверждено в печать Научно-техническим советом
института «Якутнипроалмаз»

Без объявления

ISBN 978-5-02-023208-2

© В.Ф.Колганов, И.Ф.Бондаренко,
А.Ю.Давыденко, П.В.Васильев
2008

© Оформление. «Наука» Сибирская издательская
фирма РАН, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Одним из замечательных свойств человеческого ума является способность воспринимать виртуальную реальность как действительную, но только в том случае, если представленная модель объекта обладает правдоподобными на момент отображения характеристиками. Особое значение при этом имеет возможность изображение моделируемого объекта в трехмерной перспективе благодаря бурному развитию цифровых технологий для формализованного представления разнообразных горно-геологических данных. Стремительный прогресс вычислительной техники и методов обработки огромных массивов цифровых данных объективно определил тенденции развития геоинформационных систем [36], позволяющих эффективно использовать мощный арсенал современных методов геостатистики, аналитических средств, моделирования и визуализации для учета, оценки реальной обстановки и оптимизации рациональных решений на различных стадиях развития горного производства.

По мере накопления геологической информации в процессе изучения кимберлитового месторождения наступает момент, когда возможно и целесообразно создание его трехмерной модели, более полно и эффективно отражающей реальную геологическую ситуацию и распределение изучаемого признака в пространстве рудного тела. Наиболее полная реализация данных, характеризующих исследуемый объект, - создание его цифровой трехмерной геолого-математической модели. Это значительно облегчает обращение с информацией за счет визуализации в трехмерном пространстве структуры и взаимоотношений контактных поверхностей, отдельных пластов, выделенных геологических блоков, разрезов в любых плоскостях, позволяет относительно легко корректировать модель по мере обновления и пополнения геологической информации и повышает эффективность исследований с использованием геостатистического анализа.

Применение геоинформационных систем при разведке и проектировании горно-геологических работ позволяют создавать базу данных, проводить геостатистический анализ и геолого-математическое моделирование для оценки месторождения и геологических блоков. В свою очередь, это дает возможность прогнозировать геометрию рудных тел и распределение содержаний алмазов, выполнять оптимизацию параметров карьера с определением конечной глубины отработки, а также проводить расчет технико-экономических параметров эффективности отработки месторождения. Геостатистические методы расчета распределения содержаний алмазов в сочетании с использованием трехмерных редакторов при оконтуривании рудных тел и более точными методами подсчета объемов при их сложной морфологии позволяют существенно уточнять запасы месторождения. Методика прогнозирования геометрического строения кимберлитовых

трубок дает возможность учесть варианты развития направления карьера и горно-геологических работ, а расчеты технико-экономического риска при отработке месторождений позволяют уточнить возможные отклонения характеристик рудного тела и экономических параметров, и, как следствие, определить вероятную эффективность проекта. В основе прогнозирования обычно лежат многовариантные исследования с применением методов имитационного моделирования. Учет технико-экономического риска дает необходимую информацию о состоятельности проекта и возможных отклонениях при расчетах прибыли и чистого дисконтированного дохода при реализации стадии разработки месторождения или проекта в целом [41].

Даже на начальном этапе исследований, работа по формированию объемной цифровой модели способна изменить существующие представления о геологическом строении изучаемого объекта. Трехмерная геолого-математическая модель дает возможность отображения всей совокупности привлеченной для ее создания информации, что существенно отличается от таких традиционных форм представления геологических данных, таких как двумерные карты и разрезы.

Необходимо отметить, что в некоторой степени неравномерная геологическая изученность месторождений, не может не сказываться на информационной обеспеченности геологического моделирования. В подобных условиях использование программного обеспечения, позволяющего проводить объемное моделирование геологических объектов с возможностью контроля и корректировки хода структурно-геологических построений на любом их этапе в интерактивном режиме, во многом определяет эффективность формируемых моделей.

Геолого-математическая модель кимберлитового месторождения кроме геометризации рудного тела и вмещающих горных пород, отражающих геологическое строение, должна нести в себе информацию о распределении содержаний алмазов в пространстве рудного тела, данные о физико-механических свойствах пород, иные характеристики, необходимые для нормального функционирования горнорудного предприятия, эксплуатирующего месторождение. При этом первичные знания об объекте пользования представляют дискретный набор информации различных свойств и параметров, и только наиболее полный анализ всех связей в их совокупности, позволяет добиться максимально эффективной деятельности производства [49, 50].

Одним из основных назначений геолого-математического моделирования является применение созданных моделей для оптимизации и планирования параметров ведения горно-геологических работ. При этом качество создаваемой модели зависит от достоверности и надежности исходных данных. К важным факторам, влияющим на конечный результат при создании геолого-математических моделей, относится точность как геометрической переменной, так и промежуточных расчетов исследуемых признаков (содержание, физико-механические свойства и т.д.), поскольку при дальнейшем использовании полученных данных необходимо иметь представление о достоверности и надежности результатов

Современные средства вычислительной техники и программного обеспечения предоставляют геологам, маркшейдерам и горным инженерам широкие возможности при решении многих специальных задач информационно-аналитического сопровождения процессов разведки, добычи и переработки минерального сырья. Компьютерные

технологии оценки запасов полезных ископаемых сегодня применяются не только на этапе геологического изучения месторождений и на стадии технико-экономического обоснования проектов их освоения, но и внедряются в практику ежедневной работы горнодобывающих предприятий.

Цель настоящей монографии – познакомить читателя с методами компьютерного моделирования и оптимизации, применяемыми при разработке алмазоносных месторождений.

Повышение экономической эффективности отработки запасов алмазоносных месторождений неразрывно связано с возможностью улучшения компьютерного моделирования и визуализации геологического строения кимберлитовых трубок и прогнозирования результатов ведения горных работ. Применение математических методов построения комплексных цифровых моделей кимберлитовых трубок предъявляет высокие требования к уровню программно-аппаратной оснащенности исследований и подготовки специалистов, поскольку помимо навыков решения базовых геолого-маркшейдерских задач предполагает знание специалистом компьютерных методик построения каркасных и блочных моделей рудных тел и методов оптимизации разработки месторождений на протяжении всего срока их эксплуатации.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1.1 ЯКУТСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ

В проблеме минерально-сырьевых ресурсов России алмазы, по сравнению с другими полезными ископаемыми, занимают особое место. Алмаз, характеризующийся простым химическим составом, представляет исключительно сложный объект исследования наук о Земле. Алмаз является наиболее достоверным представителем глубинных зон континентальной литосферы и химический состав силикатной среды, в которой он кристаллизуется, отражает особенности состава верхней мантии.

Хорошо известно, что открытию месторождений алмазов в пределах северной части Сибирской платформы предшествовал выдающийся научный прогноз, сформулированный в 1940 г. (за 15 лет до открытия месторождений) академиком В.С.Соболевым и основанный на сходстве геологического строения и особенностей магматизма севера Сибирской платформы с Южной Африкой.

Со времени открытия кимберлитов Сибирской платформы в 1954 году, в течение последующих сорока лет было выявлено около 1000 кимберлитовых тел, включая дайки, общий диапазон возраста внедрения которых составляет около 300 млн. лет (от 450 до 150 млн. лет). Все кимберлитовые тела располагаются в пределах 25 кимберлитовых полей, охватывающих общую территорию Северной части Сибирской платформы, площадь которой составляет более 1 млн.км². Абсолютное большинство кимберлитовых полей находится на территории Якутии, и поэтому вся провинция носит название Якутской кимберлитовой провинции.

Достоверное установление возраста внедрения кимберлитов имеет исключительно важное значение для понимания их генезиса и соотношения с тектоникой и магматизмом в конкретных регионах. Такие исследования, начатые для Якутской кимберлитовой провинции еще в начале 60-х годов, вскоре после открытия алмазных месторождений, позволили в самом общем виде выделить три разновозрастные эпохи внедрения кимберлитов Якутии; среднепалеозойскую, триасовую и позднемезозойскую. Якутская алмазоносная провинция расположена в северо-восточной части Сибирской платформы (Рис. 1.1) и включает в себя частично или полностью главнейшие надпорядковые структуры платформы: Анабарскую, Непско-Ботуобинскую антеклизы, Тунгусскую и Вилуйскую синеклизы, Сюгджерскую седловину, соединяющую названные положительные и отрицательные геоструктуры. В целом, якутская алмазоносная провинция относится к наиболее стабильному ядру платформы, слабо тектонически дислоцированному и с наименьшими мощностями вулканогенно-осадочного чехла. Перикратонный, Ангаро-Вилуйский и Приверхожянский краевой прогибы окаймляют стабильное ядро с юго-запада и востока, отделяя его от Байкало-Патомской и Верхоянской горно-складчатых областей. Кристаллический фундамент Сибирской платформы, выходящий на дневную поверхность лишь в пределах Анабарского и Алданского щитов, сложен раннеархейскими-раннепротерозойскими метаморфическими и магматическими образованиями: разнообразными гнейсами, кристаллическими

сланцами, амфиболитами, кварцитами и кальцифирами, а также габбро-долеритами, диоритами, гранитами и анортозитами. Согласно определениям абсолютного возраста, указанные образования консолидированного фундамента сформировались ранее 2,5 – 2,6 млрд. лет. На антеклизах и их склонах, на Сюгджерской седловине, где развит вулканогенно-осадочный чехол мощностью до четырех км, кристаллический фундамент вскрыт редкими нефтеразведочными скважинами. Вещественный состав пород фундамента, а также ксенолитов кимберлитовых трубок, в совокупности с данными геофизических методов, являются единственным фактическим материалом для суждения о вещественно-тектоническом строении кристаллического фундамента и истории его формирования на огромных территориях платформы с мощным осадочным чехлом. Согласно этим данным на некоторых участках платформы развиты протоплатформенные нижнепротерозойские образования. Их примером служит эйекитская серия (осадочно-вулканогенные породы мощностью более 3,5 км), ограниченно обнажающиеся на Анабарской антеклизе.

К наиболее ранним образованиям вулканогенно-осадочного чехла Сибирской платформы относятся образования рифея. Они сформировались в прогибах, типа авлакогенов, несогласно залегающих на отложениях нижнего протерозоя, и представлены терригенными, карбонатными и вулканогенными образованиями. Отложения вендской системы того или иного стратиграфического объема, в тех или иных мощностях в пределах плиты платформы развиты повсеместно. Вулканогенно-осадочный чехол платформы и ее современная тектоническая структура сформировались в несколько этапов, имеющих региональное значение. Этапам соответствуют структурные ярусы, разделенные стратиграфическими или угловыми несогласиями.

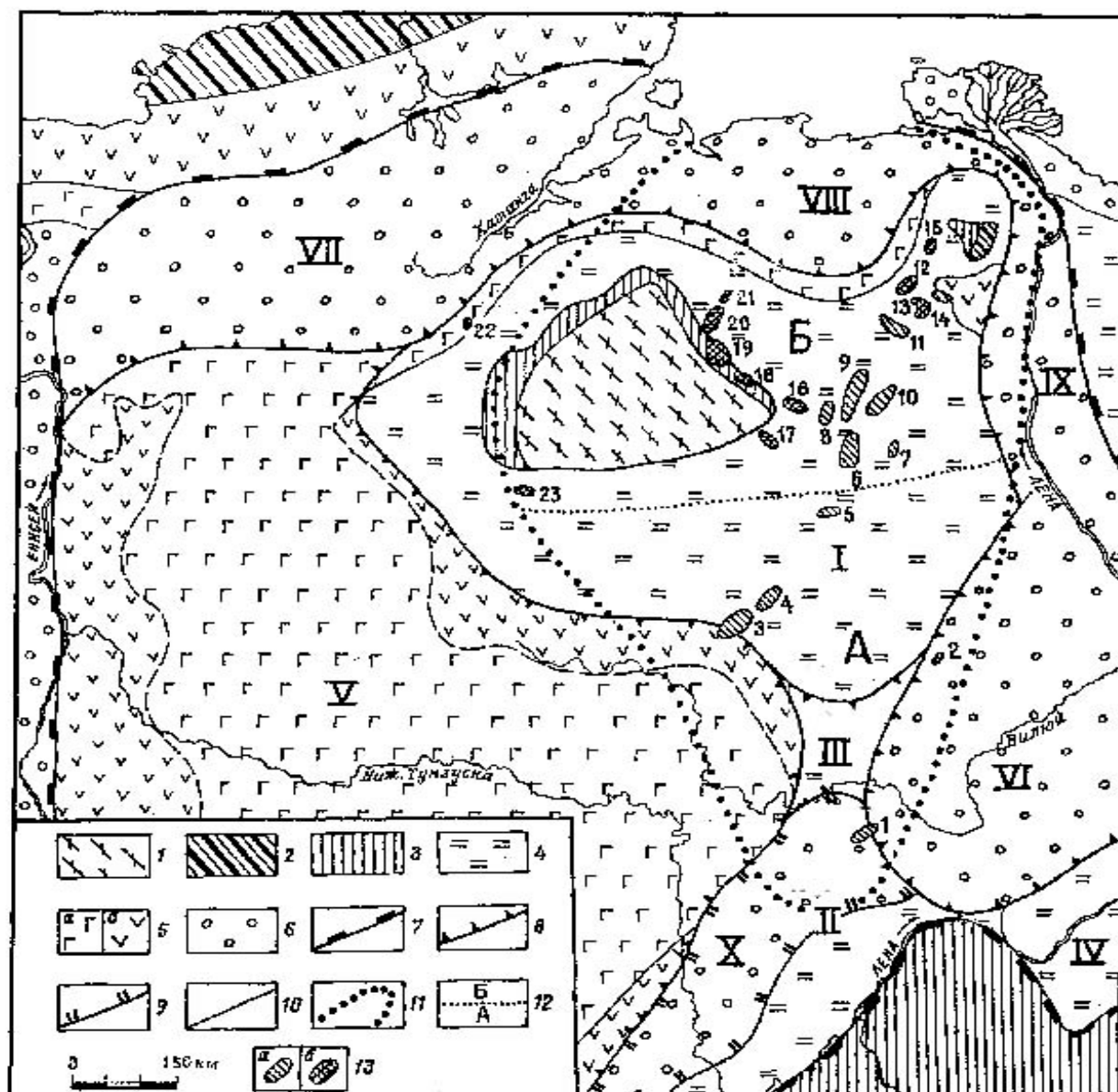


Рис. 1.1 Структурно-формационная схема Сибирской платформы
(по К.Б. Мокшанцеву, Н.И. Гореву и др.)

Условные обозначения к Рис. 1.1

1 – Магматические и метаморфические формации архея; 2 – Метаморфизованные вулканогенно-осадочные породы нижнего протерозоя; 3 – Осадочные и магматические формации верхнего протерозоя; 4 – Терригенно-карбонатные формации нижнего палеозоя; 5 – Терригенные, вулканогенно-терригенные, угленосные (а) и магматические (трапповые) формации (б) верхнего палеозоя; 6 – Терригенные формации мезозоя-кайнозоя; 7 – Современная граница Сибирской платформы; 8 – Границы региональных структур платформы и их названия: I - Анабарская антеклиз, II - Непско-Ботубинская антеклиз, III - Сюгджерская седловина, IV - Алданская

антеклиза, V - Тунгусская синеклиза, VI - Вилуйская синеклиза, VII - Енисейско-Хатангский прогиб, VIII - Лено-Анабарский прогиб, IX - Приверхоянский прогиб, X - Ангара-Вилуйский прогиб, 9 – Граница Ангара-Вилуйского прогиба; 10 – Границы формаций; 11 – Предполагаемый контур Якутской алмазоносной провинции; 12 – Граница между алмазоносными областями: А - Вилуйская, Б - Анабаро-Оленекская; 13 – Кимберлитовые поля среднепалеозойского (а) и мезозойского (б) возраста: 1 - Мирнинское, 2 - Накынское, 3 - Алакит-Мархинское, 4 – Далдынское, 5 - Верхнемунское, 6 - Чомурдахское, 7 - Севернейское, 8 - Западно-Укукитское, 9 - Восточно-Укукитское, 10 - Огонер-Юряхское, 11 - Мерчимденское, 12 – Куойкское, 13 - Верхнемолодинское, 14 - Толуопское, 15 - Хорбусуонское, 16 - Лучаканское, 17 - Куранахское, 18 - Дьукенское, 19 - Среднекуонапское, 20 - Нижнекуонапское, 21 - Орто-Ыаргинское, 22 - Котуйское, 23 – Харамайское.

Выделяются следующие структурные ярусы:

1. Рифейский.
2. Вендско-среднекембрийский с двумя подъярусами: нижневендским (условно) и верхневендско-среднекембрийским. Первый подъярус представлен карбонатно-терригенными формациями, второй – карбонатными, пестроцветными терригенно-карбонатными и галогенно-карбонатными формациями.
3. Верхнекембрийско-силурийский ярус, также с двумя подъярусами: верхнекембрийско-нижнеордовикским и среднеордовикско-силурийским. Ярус представлен терригенными красноцветными и пестроцветными формациями, сероцветными карбонатными формациями.
4. Девонско-нижнекаменноугольный или среднепалеозойский ярус представлен пестроцветными сульфатно-карбонатными, терригенными и вулканогенно-терригенными формациями, генетически связанными с крупными среднепалеозойскими авлакогенами (Котуйским, Билиро-Уджинским, Патомско-Вилуйским). Соответствующие образования широко развиты в Тунгусской синеклизе, в Кютюндинском грабене, в Ыгыаттинской и Кемпендйской впадинах (Матухин, 1991). Образования Ыгыаттинского комплекса в современном денудационном срезе ЯАП практически отсутствуют.
5. Среднекаменноугольный – пермский (или верхнепалеозойский) структурный ярус представлен терригенными и терригенно-угленосными формациями. Их формирование связано с началом интенсивного прогибания Тунгусской синеклизы и Приверхоянского прогиба, где накопились значительные мощности этих отложений. В пределах стабильных структур платформы в эрозионно-тектонических депрессиях подстилающего субстрата накапливались отложения сокращенного стратиграфического объема и незначительной мощности (не более 200 м).
6. Нижнетриасовый – мел-палеогеновый (мезозойский) ярус включает нижнетриасовый, верхнетриасово-юрский и мел-палеогеновый подъярусы.

Нижнетриасовый подъярус развит в основном в Тунгусской синеклизе, где представлен мощной (2–3 км) толщей осадочно-вулканогенных образований – туфами, туффитами, базальтовыми покровами, прорванными интрузиями траппов. Туфогенные отложения незначительной мощности развиты на некоторых площадях по периферии Тунгусской синеклизы. Отложения верхнетриасово-юрского подъяруса в терригенных

континентальных и морских фациях развиты преимущественно в Вилуйской синеклизе, а также в сокращенных мощностях и в неполном стратиграфическом объеме в Ангаро-Вилуйском прогибе. Прогиб наложен на Непско-Ботуобинскую антеклизу и Сюгджерскую седловину, где нижнеюрские отложения выполняют отрицательные формы погребенного рельефа.

Меловые отложения на большей части Сибирской платформы отсутствуют. Они широко представлены в центральных районах Вилуйской синеклизы и в Приверхоянском прогибе.

Магматическая деятельность проявилась на Сибирской платформе в рифее, в среднем палеозое и мезозое. Проявления рифейского магматизма, представленного базитовыми дайками и силлами, известны на Анабарской антеклизе.

Со среднепалеозойским этапом связана тектоно-магматическая активизация Сибирской платформы, проявившаяся в перестройке структурного плана, регенерацией и заложением авлакогенов и зон разломов.

В интервале от среднего девона до раннего карбона произошло внедрение даек и силлов, а также образование трубок взрыва, представленных долеритами, субщелочными габбро-долеритами, щелочно-основными, щелочно-ультраосновными породами. Характерны протяженные дайковые пояса, простирающиеся на сотни километров вдоль бортов среднепалеозойских авлакогенов (Вилуйско-Мархинская, Чаро-Синская зоны) или по активизированным зонам разломов (Молодо-Попигайская, Уджинская, Далдыно-Оленекская зоны). К этим зонам приурочены кимберлитовые поля. Например, к Вилуйско-Мархинской зоне приурочены Мирнинское и Накынское кимберлитовые поля.

В раннем триасе базитовый магматизм наиболее интенсивно проявился в пределах Тунгусской синеклизы, где образовалась мощная туфолавовая толща, интродуцированная силлами долеритов. Трапповые интрузии широко распространены и за пределами Тунгусской синеклизы, на Сюгджерской седловине и Непско-Ботуобинской антеклизе в виде хонолитов, субпластовых тел неправильной формы. Они залегают преимущественно среди верхнепалеозойских отложений и представлены недифференцированными или слабо дифференцированными долеритами, габбро-долеритами, долеритами со щелочным уклоном. С учетом абсолютного возраста и химического состава интрузий выделяется несколько комплексов (катангский, кузьмовский, ангарский, амовский и др.). В пределах якутской алмазоносной провинции наиболее распространены интрузии самого раннего недифференцированного катангского комплекса. На севере субпровинции, кроме образований трапповой формации, на завершающей стадии подэтапа внедрились породы ультраосновного состава, в том числе кимберлиты.

С позднемезозойским подэтапом связано образование кимберлитовых трубок на территории Оленекского поднятия.

Таким образом, в якутской алмазоносной провинции устанавливается три эпохи кимберлитового вулканизма: среднепалеозойская, раннемезозойская и средне-позднемезозойская. Всего в субпровинции выявлено около 1000 кимберлитовых тел, объединенных в 23 кимберлитовых поля (Рис. 1.1). Следует подчеркнуть, что все кимберлитовые поля с высокопродуктивными алмазоносными трубками находятся в южной части провинции. Здесь выделяются Мирнинское, Накынское, Алакит-Мархинское, Далдынское и Верхне-Мунское поля, включающие все известные коренные месторождения алмазов Якутии – это трубки Мир, Интернациональная, Айхал, Удачная, Юбилейная и другие. Кимберлитовые породы южной части ЯАП по ряду признаков

отличаются от кимберлитов севера провинции. Возраст кимберлитов южной части якутской алмазоносной провинции по геологическим данным оценивается как среднепалеозойский (поздний девон – ранний карбон) на том основании, что терригенные осадочные породы среднекаменноугольного возраста содержат минералы-спутники алмаза, а в кимберлитовых трубках Мирнинского поля обнаружены ксенолиты базальтов, которые по своему составу аналогичны базальтам девонского возраста. Абсолютный возраст кимберлитов, установленный по соотношению изотопов свинца и урана в разных трубках, характеризуется широким возрастным диапазоном – от 360 до 440 млн. лет.

В течение среднепалеозойского времени и до наших дней кимберлитовые тела, как и вмещающие их породы, периодически подвергались размыву. Величина эрозионного среза разными авторами оценивается от 80 – 120 до 500 – 600 м. Большинство исследователей склоняются к величине 300 – 350 м.

1.2 ГИПОТЕЗЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВ

До сих пор внимание многих исследователей продолжают привлекать вопросы о глубинах зарождения и дифференциации кимберлитовых расплавов, особенностях магматических очагов кимберлитовых тел и генезисе алмазов.

Существующие представления по этим вопросам можно разделить на две большие группы, каждая из которых включает несколько подгрупп.

Согласно представлениям одной группы кимберлитовые расплавы зарождаются в подкоровых глубинах планеты среди пород верхней мантии, где термодинамические условия обеспечивают кристаллизацию алмаза и пиропы. Поднявшись к подножию коры, они затем в короткий срок достигают поверхности и застывают, консервируя метастабильный при низких давлениях алмаз.

Вторая группа объединяет гипотезы, согласно которым поднявшиеся из подкоровых глубин или глубоких горизонтов земной коры ультраосновные магмы эволюционируют и приобретают специфические особенности, обеспечивающие в дальнейшем зарождение из них кимберлитов на глубине первых километров от земной поверхности в промежуточных очагах. В этих очагах в результате взрывов подсасывающихся из вмещающих толщ углеводородов или газовой фазы магмы при пульсирующих движениях земной коры возникают условия, необходимые и достаточные для кристаллизации алмаза.

Наиболее разработаны в теоретическом отношении, аргументированы и обоснованы фактическим материалами гипотезы, согласно которым кимберлиты зарождаются и эволюционируют в верхней мантии. Расхождения между гипотезами этой группы, касаются места и времени кристаллизации алмазов, пиропов, пироксенов и других минералов, что позволяет эти гипотезы разделить на две подгруппы.

Сторонники гипотез первой подгруппы считают, что родственные включения и отдельные их минеральные компоненты являются обломками пород верхней мантии, а возникающая при частичном плавлении субстрата кимберлитовая магма служит своего рода "транспортёром", выносящим раздробленный материал из подкоровых глубин к земной поверхности.

Согласно гипотезам второй подгруппы кимберлитовые магмы возникают также в результате частичного плавления мантийных пород, а радиальное перемещение их осуществляется по механизму зонного плавления. Поступательное радиальное движение расплава при таком механизме происходит в результате проплавления кровли и

осаждения близкого по объему количества вновь кристаллизирующихся минеральных фаз в нижней части магматического очага. Следовательно, радиальное перемещение магматических очагов по механизму зонной плавки неизбежно сопровождается постепенным изменением состава магмы.

В вопросе размещения и локализации кимберлитовых тел, большинство исследователей главную роль отводят разрывным нарушениям. В частности высказывается точка зрения о существенной роли (в качестве рудоподводящих каналов для кимберлитового магматизма) ослабленных зон, расположенных в узлах пересечения разновозрастных глубинных разломов фундамента. При этом рудовмещающими считаются дизъюнктивные нарушения, вызванные активизацией глубинных разломов фундамента, проявившиеся в верхнепалеозойское время.

1.3 ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОЗИЦИИ ПРОЯВЛЕНИЙ КИМБЕРЛИТОВ

Пространственно кимберлиты локализованы в пределах архейских и архейско-нижнепротерозойских ядер-кратонов, обладающих консолидированной корой, мощной и относительно жесткой литосферой и низкоградиентными тепловыми потоками Мирнинское, Накынское, Далдынское и Алакит-Мархинское кимберлитовые поля расположены в области сопряжения двух крупных мегаблоков Сибирской платформы - Анабарского и Тунгусского. Мегаблоки отличаются внутренней структурой и вещественным составом кристаллического фундамента, что отчетливо проявляется в морфологии региональных магнитных аномалий. Фундамент в пределах Анабарского мегаблока сложен архейскими метаморфитами, аналогами формаций Анабарского массива и частично Алданского щита. По данным изучения ксенолитов пород фундамента из кимберлитовых тел и характеру магнитного поля достаточно уверенно картируются образования, относящиеся к осадочно-вулканогенной, эндербитовой и вулканогенно-осадочной группам формаций.

Как отмечено выше, кимберлитовый магматизм большинством специалистов пространственно коррелируется с развитием региональных внутриплитных рифтогенных структур, активизированных в раннегерцинскую эпоху тектономагматической активизации, а также с глубинными вещественно-структурными неоднородностями литосферы. Роль рифтогенеза в формировании кимберлитового магматизма представляется весьма многогранной.

Во-первых, тектоническое строение древних платформ, в том числе Сибирской, в значительной степени определялось развитием долгоживущих докембрийских рифтогенных систем.

Во-вторых, щелочные магматические ассоциации, в том числе и кимберлиты, характерны исключительно для наиболее глубинных магмоводов континентальных рифтовых систем и не встречаются в условиях других эндогенных режимов.

В-третьих, рифтогенные системы можно рассматривать как энергетические источники, способные обеспечить благоприятный геодинамический режим для кимберлитообразования в определенных околорифтовых зонах. Этими зонами являются участки компенсации растягивающих рифтогенных напряжений, характеризующиеся геодинамическим режимом преобладающего сжатия и носящие название зон рампов или краевых дислокаций.

Гипотеза о связи кимберлитового магматизма с рифтогенными структурами поддерживается многими исследователями, хотя несовпадение положения кимберлитовых полей непосредственно с рифтовыми системами нередко выдвигается как довод отсутствия между ними генетической связи.

Кимберлитопроявления образуют площадные сообщества сближенных во времени и пространстве тел, получивших название кимберлитовые поля. Большая часть кимберлитовых тел сосредоточена в зоне, протягивающейся от Далдынского до Оленекского поднятий. Кимберлитовые тела здесь локализованы среди широкого спектра вмещающих пород - от вендского (Оленекское поднятие) до нижнесилурийского возраста (Алакит-Мархинское поле). Ряд полей располагается на восточном склоне Анабарского поднятия (поля Анабарской группы) в разрезе пород протерозойского и ниже-среднекембрийского возраста и только единичные тела в разрезе кристаллических пород архея. Территориально обособлены Мирнинское и Накынское поля. Накынское кимберлитовое поле пространственно приурочено к средней части Вилуйско-Мархинской зоны глубинных разломов, а Мирнинское поле тяготеет к ее южному окончанию и к северо-восточному склону Непско-Ботуобинской антеклизы. Кимберлитопроявления региона сформированы в семь возрастных эпох. Наиболее распространены кимберлитовые образования раннедевонской-раннекарбоновой эпохи, с которой связана значительная часть кимберлитопроявлений Мирнинского, Накынского, Далдынского, Алакит-Мархинского полей и, в частности, все промышленно алмазоносные тела. Другими эпохами, с которыми связано массовое образование кимберлитовых тел, являются триасовая и верхнеюрская. Кимберлитопроявления этих эпох располагаются преимущественно в пределах Восточно-Анабарской зоны распространения кимберлитовых пород. Остальные четыре эпохи (позннедевонская, верхнесилурийская-нижнедевонская, меловая и раннекайнозойская) представлены единичными телами, располагающимися среди кимберлитовых тел иного возраста.

Каждая возрастная эпоха представлена почти всеми морфогенетическими типами тел. Взаимоотношения дайковых тел и штоков с кимберлитовыми трубками в пределах одной эпохи кимберлитообразования устанавливается по постоянному присутствию обломков слагающих их пород в кимберлитовых брекчиях трубок. Характер взаимоотношения жильных пород, вскрытых в околотрубочном пространстве, с трубками свидетельствует о дотрубочном образовании сопряженных с трубками кимберлитовых жил и о формировании непосредственно залегающих в теле трубки жил после завершения ее становления путем выполнения трещин в процессе консолидации вещества трубок

1.4 ВОЗРАСТНЫЕ АСПЕКТЫ КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА

В палеогеологической истории провинции фиксируется семь периодов активизации кимберлитового магматизма в периоды длительного или контрастного воздымания крупных участков древних платформ, сопровождаемых региональными перерывами в осадконакоплении и формированием кор выветривания:

- поздний ордовик - 440-450 млн. лет;
- поздний силур - ранний девон - 410-395 млн. лет;
- поздний девон - ранний карбон - 370-320 млн. лет;
- средний - поздний триас - 240-215 млн. лет;
- поздняя юра - 160-145 млн. лет;

- граница раннего и позднего мела - 105-95 млн. лет;
- ранний - средний палеоген - 60-50 млн. лет.

Но так как ни одного кимберлитового тела в поздневендской, ранне - среднеордовикской и неогеновой эпохах на территории якутской алмазоносной провинции пока не обнаружено, то, очевидно, что наиболее значительными среди них являются следующие: силурийско - раннедевонская, позднедевонская-раннекарбоновая, средне-позднетриасовая, позднеюрская.

Мирнинское поле

Кимберлитовмещающими для тел данного поля являются породы верхнего кембрия и усть-кутского яруса нижнего ордовика; некоторые из них перекрыты маломощным чехлом нижнеюрских осадков. Все имеющиеся датировки по тр. Мир свидетельствуют о ее формировании в эпоху D₃-C₁. Возраст кимберлитовых пород трубки составляет 358±6 млн. лет. Наиболее древними, согласно данным, являются кимберлитовые породы трубки Амакинская - 486±18 млн. лет. Несколько уступают им возрастные датировки пород трубок им. XXIII съезд КПСС (433±16 млн. лет) и Таежная (397±9 млн. лет). Далее следуют кимберлиты трубок Интернациональная (368±11 млн. лет) и Дачная (358±6 млн. лет). Из отмеченного следует, что Мирнинское кимберлитовое поле в основном сформировалось в эпоху D₃-C₁, но первые проявления кимберлитового магматизма на этой территории, вероятно, отвечают S₂-D₁ и, возможно, O₃ возрасту.

Накынское поле

Это поле представлено тремя телами, прорывающими карбонатные породы олдондинской свиты раннего ордовика и перекрытыми раннеюрскими осадками мощностью около 80 м. Даты, полученные для трубок Ботуобинская и Нюрбинская позволяют относить время формирования поля к позднеордовикской эпохе, что не противоречит геологическим данным. На настоящий момент, это наиболее древние кимберлиты якутской алмазоносной провинции. Первые попытки определить время проявления кимберлитового магматизма Накынского поля изотопными методами дали оценку их возраста в интервале значений 332 - 450 млн. лет.

По совокупности всех данных для кимберлитов трубки Ботуобинская возраст их равен 445±4 млн. лет. Однако для решения вопроса о возрасте проявления кимберлитов, учитывая результаты фаунистических определений, необходимы дальнейшие изотопно-геохронологические работы, включая разноплановое датирование дотрубочных и послетрубочных базитовых пород.

Алакит-Мархинское поле

Составляющие поле кимберлитовые тела прорывают отложения ордовика, некоторые - нижнего силура (пландоверийский ярус). Ряд трубок полностью, а некоторые трубки частично перекрыты отложениями среднего-верхнего карбона, перми и силлами раннетриасовых базитов. Трубки Краснопресненская, Комсомольская и Юбилейная рассечены наклонными телами пермо-триасовых долеритов.

Имеющиеся радиологические даты свидетельствуют, что из 20 «продатированных» тел Алакит-Мархинского поля 17 относятся однозначно к позднедевонской-раннекарбоновой эпохе кимберлитового магматизма.

Трубка Комсомольская. Возраст, определенный по трем автолитам, которые представляли собой наиболее сохранившиеся фрагменты первичной кимберлитовой брекчии, составляет 409, 419 и 422 млн. лет и свидетельствуют, что продатированные

породы образовались в эпоху S_2 - D_1 . Естественно, возникают сомнения, можно ли распространить эти результаты на всю трубку, но несомненно, что первая фаза кимберлитообразования, с которой связано формирование этих автолитов, относится к эпохе S_2 - D_1 .

Трубка Сытыканская. Определения возраста кимберлитов методами, аналогичными выше отмеченным, соответственно составляют 384 ± 14 млн. лет и 344,2 млн. лет. Очевидно совпадение результатов по этим двум трубкам.

Трубка Юбилейная. Возраст пород трубки, определенный по вскрытым в карьере порфировым кимберлитам и автолитовым кимберлитовым брекчиям, порфировым кимберлитам из скважин с глубины 510 и 710 м восточной части трубки и с глубины 710 м западной части трубки, показывает диапазон датировок 341-354 млн. лет.

Далдынское поле

Трубка Удачная. Средний возраст для трубки Удачная-Восточная составляет 361 млн. лет, для Удачной-Западной - 346 млн. лет.

Трубка Дальняя. Возраст пород трубки составляет 392-395 млн. лет. Возможно допустить двухфазное формирование диатремы - в начале и в середине эпохи D_3 - C_1 .

Трубка Зарница. Для образцов основной массы автолитовой кимберлитовой брекчии и автолита из нее определен возраст 364-374 млн. лет. Полученные даты свидетельствуют о том, что процесс формирования брекчии и автолитов в ней шел практически одновременно и относится к эпохе D_3 - C_1 .

1.5 ПЕТРОГРАФИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ КИМБЕРЛИТОВ

Вещественный состав кимберлитовых пород, выполняющих трубки, весьма разнообразен. Наиболее распространенной разновидностью кимберлитов является кимберлитовая брекчия, присутствующая практически во всех изученных телах. Массивные порфировые кимберлиты имеют ограниченное распространение, слагают самостоятельные жилы и жилы, пространственно связанные с крупными трубками (Удачная, Зарница и др.). Еще реже встречаются порфировые кимберлиты с редкими вкрапленниками - спорадофировые и афировые кимберлиты (трубка Удачная-Западная.). Эти разновидности представлены в виде отдельных блоков, слагающих в основном приконтактные части трубок или внутритрубочные образования. Содержание ксеногенного материала в текстурно-структурных разновидностях кимберлитов значительно варьирует - от 1-2 до 50-60 %. По составу среди обломков преобладают карбонатные и глинисто-карбонатные породы осадочного чехла. Включения пород фундамента и мантии составляют в кимберлитах не более 5 % от общего объема ксеногенного материала.

Главными породообразующими минералами кимберлитов являются оливин и флогопит, представленные в виде порфировых выделений и микролитов основной массы. По количественному соотношению флогопита кимберлиты подразделяются на следующие разновидности (Егоров и др., 1986, 1991): 1) базальтоидные кимберлиты, содержащие менее 5 % флогопита (характерны для большинства кимберлитовых трубок Далдынского поля); 2) слюдистые кимберлиты (5-15 % флогопита), выполняющие крупные блоки в трубках Удачная-Западная, Осенняя, Алтайская и др.; 3) слюдяные кимберлиты (более 15 % флогопита), слагающие полностью трубку Загадочная, отдельные фазы в трубках Удачная-Восточная, Зарница, Поздняя и др. Кроме порфировых выделений оливина и флогопита в кимберлитах встречаются вкрапленники граната, ильменита, шпинели,

энстатита, диопсида. Общее содержание этих типоморфных минералов, как правило, не превышает 5%.

Минеральный состав основной массы кимберлитов также различен. Обычно она сложена на 30-40 % идиоморфными псевдоморфозами серпентина и карбоната по оливину размером 0,3-0,6 мм, таблитчатыми, округлыми выделениями (0,5-1 мм) флогопита (2-3 %), микролитами или неправильными обособлениями кальцита (10-15 %), изометричными, редкими (1-3 %) зернами апатита, а также рудными минералами (шпинель, перовскит, ильменит) в количестве 5-10 %. Связующая матрица кимберлита сложена карбонат-серпентиновым тонкозернистым агрегатом.

Изложенное показывает широкие вариации состава кимберлитовых пород, что требует самостоятельного рассмотрения принципов выделения разновидностей пород и их номенклатуры.

Несмотря на многолетние разноплановые исследования кимберлитовых пород, до настоящего времени нет единой общепринятой схемы их классификации. Это вызвано как сложностью состава самих пород, так и дискуссионностью многих аспектов кимберлитообразования.

Порфиновые кимберлиты (или кимберлитовые брекчии с массивной текстурой цемента) представляют собой породы эффузивного облика порфировой и реликтовой порфировой структуры и массивной, иногда брекчиевой или брекчиевидной текстуры (при содержании гетерогенного обломочного материала до 5-10 %). Основная масса представлена кимберлитом с микролитовой, редко микрокристаллической структурой.

Данная разновидность кимберлитовых пород характеризуются в среднем меньшим содержанием обломочного материала, чем описанные ниже автолитовые кимберлитовые брекчии. Порфиновые выделения в кимберлите, цементирующем обломочный материал, имеют размеры 0,2-10 мм, отдельные вкрапленники достигают 5-10 см. Наряду с оливином, составляющим большинство порфировых выделений, во вкрапленниках отмечены флогопит, гранат, ильменит, очень редко энстатит, титанклиногумит или их сростки с оливином. Оливин характеризуется различной степенью идиоморфизма и вторичного изменения. В псевдоморфозах по оливину развиваются серпентин, карбонат, реже пироаурит, тальк.

Основная масса кристаллически зернистая и состоит из варьирующих количеств оливина, монтichelлита, пироксена, флогопита, апатита и почти постоянно присутствующих карбоната, серпентина, рудных минералов. Структура основной массы однородная или микротаксовая. Минералы в основной массе распределяются равномерно или образуют скопления. В зависимости от преобладающего в основной массе минерала среди кимберлитов трубчатых тел также можно выделить несколько разновидностей, например, порфиновые кимберлиты с монтichelлитовой, пироксеновой, флогопитовой и т.д. основной массой, но наиболее часто преобладают разности кимберлитов с серпентин-карбонатной или карбонат-серпентиновой основной массой.

Автолитовые кимберлитовые брекчии (или эруптивные брекчии кимберлитов) представляют собой кимберлитовые породы брекчиевой, иногда флюидальной текстуры и литокластической или литокристаллокластической структуры, состоящие из переменного количества (5-50 %) разноразмерных сферических, субсферических, часто неправильных по форме автолитов, располагающихся в связующей массе. Связующая масса в подавляющем большинстве случаев состоит из варьирующих количеств серпентина и карбоната в крупных зернах. Нередко, кроме серпентина и карбоната, в ней присутствуют

те же минералы, что и в автолитовых образованиях, но в гораздо меньших количествах. Ксенолиты и глубинные включения располагаются как в автолитах, так и вне их.

Следовательно, отличием автолитовых кимберлитовых брекчий от порфировых кимберлитов является более высокое содержание ксенолитов, главным образом осадочных пород. Макроскопически они представляют собой породу, состоящую из разноразмерных автолитов, между которыми располагается связующая масса. Необходимо отметить, что не во всех кимберлитовых трубках и даже частях трубок эта текстура проявлена одинаково четко. Часть автолитов состоит из ядра и оболочки, часть имеет порфировое и афировое строение. Ядром автолита наиболее часто служат вкрапленники оливина, частично или полностью замещенные вторичными минералами, реже флогопит, гранат, ильменит, рудные минералы, ксенолиты вмещающих и ультраосновных пород. Размеры ядерных автолитов варьируют от 0,2 мм до 10-15 см и определяются размером и составом ядра. Наибольшие размеры имеют автолиты, в ядрах которых располагаются ксенолиты разнообразных пород. Ширина оболочки варьирует от сотых долей миллиметра до 3 см, но в большинстве случаев не превышает 5 мм. Структура оболочки порфировая или афировая, в зависимости от ее мощности. Некоторые оболочки имеют флюидальную структуру. Автолиты, имеющие порфировое строение, по размерам сопоставимы с ядерными автолитами, но встречаются и более крупные, размером до 50-70 см. Размеры афировых автолитов обычно не превышают 0,2-0,3 мм. Форма как ядерных, так и безъядерных автолитов может быть округлой или неправильной, коррелированной с "заливами" и "выступами". Отдельные автолиты имеют зональное строение. Изучение таких автолитов показало, что зональность автолиты приобретают в случаях, когда в его ядре располагается обломок, по составу тождественный интрузивному кимберлиту или кимберлитовой брекчии ранней фазы.

Связующая масса в автолитовых кимберлитовых брекчиях состоит в основном из серпентина и карбоната. Их содержание в связующей массе изменяется в широких пределах. Карбонат чаще всего наблюдается в виде ксеноморфных зерен размером 0,05-0,5 мм, реже в виде идиоморфных кристаллов, иногда образующих крустификационные каймы вокруг автолитов. Серпентин в связующей массе субизотропный, криптокристаллический и представлен смесью хризотила и лизардита. Кроме серпентина и карбоната в связующей массе иногда присутствуют гидрогранат, апатит, новообразованный флогопит.

Иногда связующая масса имеет неоднородное строение: микрокристаллическое около автолитов и мелкокристаллическое - на удалении от них.

Содержание автолитов в автолитовых кимберлитовых брекчиях колеблется от первых процентов до 45-50 % и варьирует в пределах даже одного участка трубки, наблюдаются автолитовые кимберлитовые брекчии с полосчатыми текстурами, образованные полосами с разными содержаниями автолитов. В кимберлитовых брекчиях с малым содержанием автолитов связующая масса имеет порфировую структуру, где порфировые выделения размером более 0,5 мм располагаются в микрокристаллической карбонат-серпентиновой матрице, не содержащей рудных минералов.

Встречающиеся в незначительном количестве обломки кимберлитовых пород ранних фаз внедрения, присутствующие в кимберлитовых брекчиях, выделяются под термином включения кимберлитовых пород. В брекчиях они могут находиться, как и все обломки, в автолитах или вне их. Включения кимберлитовых пород подразделяются на включения кимберлитов и включения кимберлитовых брекчий.

Включения кимберлитов представляют собой обломки пород интрузивной фации кимберлитового магматизма, которые, как предполагается, слагают на более глубоких уровнях дайки и штоки. Для них по аналогии с телами, выходящими на поверхность в районах со значительным эрозионным срезом, характерным являются массивная текстура и мелкопорфировая структура. Преобладающей фенокристаллической фазой является идиоморфный оливин, а в качестве редко встречающихся отмечаются Mg-ильменит, пироксен, гранат и флогопит.

Термины "кимберлитовый туф" и "туфобрекчия кимберлитов" фигурируют во многих классификационных схемах. В целом, кимберлитовые туфы и туфобрекчии характеризуются брекчиевой текстурой и литокристаллокластической, кристаллокластической псаммитовой или псефитовой структурой. Более половины объема (60-90 %) составляют обломки пород и кристаллов при преобладании родственного материала, которые сцементированы гидрохимическим цементом порового типа или цементом соприкосновения.

Кимберлитовые ксенотуфы и ксенотуфобрекчии представляют собой породы, отличающиеся высоким содержанием (70-95 %) обломочного материала, являющегося преимущественно раздробленными фрагментами вмещающей среды. Текстура брекчиевая, структура кристаллолитокластическая и кристаллокластическая псаммитовая или псефитовая. Цемент соприкосновения поровый, реже крустификационный гидрохимический. Кроме того, одна из характерных особенностей кимберлитов - постоянное присутствие карбонатов.

Отмеченные понятия явились определяющими для классификации кимберлитовых пород из коренных месторождений алмазов. Правомочность выделения в объеме диатрем двух основных разновидностей – автолитовые брекчии и порфировые кимберлиты - подтверждается практикой разведочных и эксплуатационных работ. Она показала, что в сложнопостроенных (многофазных) трубках самостоятельные тела сформированы, в основном, этими структурно-текстурными разновидностями кимберлитовых пород. Попытки более подробного подразделения этих типов порождают разногласия, основой которых являются разные представления о генезисе выделяемых разновидностей.

1.6 КОРЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ

Основной тип коренных месторождений алмазов - алмазоносные щелочно-ультраосновные кимберлитовые и лампроитовые породы, слагающие трубообразные тела, которые близки по условиям образования, форме, размерам, текстурно-структурным особенностям, составу и алмазоносности. Лампроиты отличаются главным образом повышенным содержанием кремнезема, калия, слюды и преобладанием среди тяжелых минералов хромшпинелида. Для целей разведки месторождения алмазов в кимберлитах и лампроитах принципиально не отличаются.

Кимберлитовые породы - вулканические и субвулканические щелочно-ультраосновные измененные породы с вкрапленниками оливина (часто замещенным серпентином и карбонатом) и в небольшом количестве флогопита, включенных в преимущественно карбонат-серпентиновую основную массу. Акцессорные минералы - пироп, пикроильменит, хромшпинелиды, хромдиопсид, энстатит, циркон, алмаз; основные вторичные - серпентин, кальцит, магнетит, перовскит, пирит, редко апатит, сапонит и др. Кимберлитовые породы содержат (обычно 5-60%) обломочный ксеногенный материал вмещающих и в подчиненном количестве глубинных мантийных пород, в некоторых из

них (эклогиты, гранатовые перидотиты) встречаются алмазы. Текстуры кимберлитовых пород - брекчиевые, массивные, флюидалные и др.; структуры - мелко-, средне- и крупнообломочные, кристалло-, лито- и кристаллолитокластические, порфировые, кластопорфировые и др.

В строении алмазоносных тел сверху вниз выделяются зоны (фации): кратерная, диатремовая и подводящего канала. В большинстве тел кратерная часть эродирована, диатремовая прослеживается на глубину от нескольких сотен метров до 1.5 км, подводящие каналы обычно представлены дайковыми телами.

Кимберлитовые диатремы относятся к трубкам взрыва, сложенным туфами, эруптивными брекчиями и интрузивными («инъективными») кимберлитами, или к типичным вулканам с туффизитами («интрузивные туфы») и эффузивными лавами, сопоставляемыми с эруптивными брекчиями и кимберлитами.

Осадочно-туфогенные и туфогенно-осадочные породы - туффиты, туфопесчаники и другие породы кратерной фации, слагающие прикратерный вал, борта и дно кратера. Их формирование связано с выбросом пирокластического материала, смытием и смешиванием его с вмещающими породами и отложением в пролювиально-озерных условиях. Диатремы выполнены кимберлитовыми туфами, туфобрекчиями, эруптивными кимберлитовыми брекчиями и собственно кимберлитами.

Кимберлитовые туфы, туфобрекчии - взрывчатый пирокластический материал с незначительным количеством ксенолитов с гидрохимическим или «туфовым» цементом. Текстура массивная, реже слоистая, структура преимущественно мелкообломочная, кристалло-, кристаллолитокластическая. Значительное количество (до 50% объема) ксенолитов - ксенотуфы, ксенотуфобрекчии с брекчиевой, слоистой текстурой. Максимально распространены в верхней части жерла и раструбах диатремы.

Эруптивные кимберлитовые брекчии с магматическим цементом и значительным (10-60%) количеством ксенолитов. Текстура преимущественно брекчиевая; структура брекчий мелко-, средне- и крупнообломочная, кристалло-литокластическая, а кимберлитового цемента - порфировая, кластопорфировая. При значительном количестве автолитов - округлых выделений так называемого кимберлита в кимберлите с концентрически-флюидалной текстурой брекчии называют автояитовыми. Эруптивные кимберлитовые брекчии широко распространены как в верхнем раструбе, так и на средних и глубоких горизонтах диатрем, автолитовые брекчии - преимущественно на средних и глубоких горизонтах.

Кимберлиты - субвулканические неполно- и полнокристаллические массивные породы с незначительным (около 5%) количеством ксенолитов, относительно пониженным содержанием пироба, порфировой структурой. Многочисленные (40-60%) псевдоморфозы, зерна свежего оливина часто имеют субпараллельную ориентировку, образуя флюидалную текстуру породы. Основная масса скрыто- или микрозернистая. Синонимы кимберлита - массивный, порфировый кимберлит. Образуют штокообразные тела, неправильной формы дайкообразные инъекции и жилы на глубоких горизонтах диатрем, редко достигая их верхней части.

По содержанию слюды (флогопита) кимберлитовые породы подразделяют на базальтоидные и слюдистые (лампрофировые): первые - с низким (до 5%) содержанием флогопита, вторые - с высоким.

Размещение и форма кимберлитовых тел, образующих промышленные месторождения алмазов России, не отличаются от других алмазоносных провинций.

Кимберлитовый магматизм характерен для древних Сибирской и Восточно-Европейской платформ, пространственно тяготеет к структурам авлакогенного типа и контролируется глубинными мантийными разломами и их пересечениями с коревыми. Рудовмещающими являются как эти основные разломы, так и оперяющие трещины.

Возраст проявлений кимберлитового магматизма от протерозойского, до позднемелового-налеоген-неогенового. Наиболее продуктивные эпохи кимберлитообразования с большинством известных промышленных месторождений: среднепалеозойская (Оз-С) на Сибирской и Восточно-Европейской платформах, позднемеловая (Кг) на Африканской.

Формы проявления - трубки взрыва, дайки, жилы и силлы. Обобщенная модель трубок по Л.Д.Харькиву, М.М.Богатых приведена Рис. 1.2.

Первая обобщенная модель кимберлитовой трубки была создана Дж.Б.Хоуторном, по данным геологического строения африканских кимберлитовых трубок. Аналогичная модель построена также для алмазоносных лампроитов Австралии. Попытка создания обобщенной модели кимберлитовой трубки для Якутской провинции предпринята в работе А.Д.Харькива с соавторами (1990), где рассмотрены закономерности геологического строения и качественных изменений минералогии и петрохимии кимберлитов.

Каждое кимберлитовое тело представляет собой индивидуальный объект, практически не повторяющийся в природе (Харькив и др., 1998, [89]). Тем не менее, между ними существует много общего, что позволяет создать модель этих тел в структуре платформенного чехла земной коры. На построенной модели выделяются три конструктивных элемента кимберлитобразующей системы: раструб, венчающийся кольцевым валом; вулканический вертикальный канал; корневая часть - подводящий канал в виде дайкового тела. Эти три элемента кимберлитовой постройки характеризуются гетерогенно-зональным строением, различным по морфологии, размеру и составу пород. Раструб, как правило, имеет воронкообразную форму, углы падения его контактов колеблются в широких пределах ($50-75^\circ$) и в значительной мере зависят от свойств вмещающих пород. Вертикальная протяженность раструба также изменяется, хотя, как показали данные разведки практически незеродированных трубок, она не превышает 300-350 м. Протяженность вертикального канала в разных трубках неодинаковая, в среднем она составляет несколько сотен метров и лишь в отдельных случаях достигает 1500-2000 м. Корневая часть, которая рассматривается в качестве подводящего канала, всегда имеет форму даек мощностью от нескольких метров до нескольких десятков метров. Охарактеризованные конструктивные элементы трубок сложены породами, имеющими определенные вещественные и текстурно-структурные особенности, которые создают вертикальную зональность коренных месторождений алмазов. Самые верхние горизонты некоторых хорошо сохранившихся раструбов трубок выполнены слоистой породой, весьма напоминающей осадочные отложения и формирующей чашеподобные структуры. Среди переслаивающихся осадков встречаются отдельные линзы мощностью до первых десятков сантиметров несортированного материала кимберлитового состава в виде такситов. У основания разреза этой части раструба располагается зона, сложенная крупными (до десятков метров) ксенолитами вмещающих пород. Кроме того, в пределах кратерной части трубок под осадочными образованиями залегают explosивно - обломочные породы - туфы и туфобрекчии с гидроксидным типом цемента.

Вулканический канал сложен эруптивными кимберлитовыми брекчиями и туффизитами. Среди них выделяются многочисленные структурно-петрографические типы и разновидности с широкими пределами колебаний состава и размеров обломков вмещающих и глубинных пород и минералов.

Породы подводящего канала представляют собой массивные (порфировые) кимберлиты. Порфировыми вкрапленниками являются оливин первой генерации, нередко подвергшийся замещению серпентином и карбонатом, реже флогопит. Основная масса кристаллически зернистая с широкими вариациями содержаний целого ряда минералов: оливина, флогопита, апатита и некоторых других.

Ксеногенный материал кимберлитовых трубок делится на генетические группы: осадочные породы платформенного чехла, являющиеся вмещающими для трубок до глубин 1,9-2,2 км; изверженные - траппы, внедрившиеся в осадочный чехол до образования диатрем; метаморфические гнейсы, слагающие фундамент платформы. Ксенолиты осадочных пород пользуются наибольшим распространением. Их содержание варьирует в широких пределах: от редких обломков до 90 процентов объема породы в, так называемых, карбонатных брекчиях.

Трубки взрыва - субвертикальные, крутопадающие трубообразные тела с воронкообразным раструбом у поверхности и чаще конусообразным каналом на глубине, образованные в результате прорыва газов и заполнения полости поднимающейся флюидизированной магматической «кашей» из обломков пород и минералов. Иногда среди обломков присутствуют породы, срезанные эрозией, что указывает на обрушение прорванных вмещающих пород в жерло. В отличие от типичных вулканов формирование трубок взрыва не сопровождается излиянием лав, завершается обычно, но не всегда» образованием кратера.

Дайки и жилы, как правило, сопровождают трубки взрыва, сопряжены с последними или расположены отдельно, иногда обособлены в самостоятельные поля. Протяженность даек и жил от нескольких десятков—сотен метров до первых километров и приуроченных к одному разлому или узлу пересечения нескольких разрывных нарушений.

Количество сопряженных с трубкой жил с глубиной увеличивается, появляются радиально расположенные жилы, что учитывается при прогнозировании и поисках трубочных тел. Кимберлитовые тела обособлены в группы. Их группа включает чаще 3-5 сближенных тел, отстоящих друг от друга на расстояние от первых десятков до сотен и более метров. Соответственно выделяют линейную группу или куст кимберлитовых тел. Группа обычно имеет протяженность 1-5 км, куст — занимает площадь в несколько квадратных километров.

Кимберлитовые породы группы трубок могут быть близкими или существенно отличаться по составу и алмазонасности, относиться к одному или разным этапам внедрения удаленным во времени на многие миллионы - десятки миллионов лет.

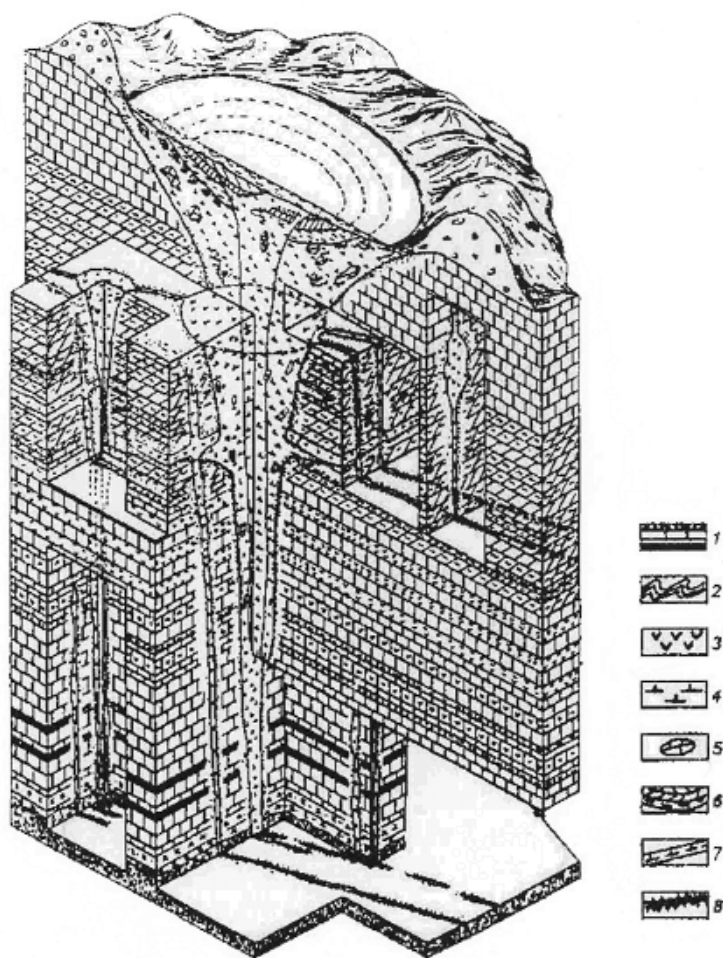


Рис. 1.2. Обобщенная модель кимберлитовых трубок: 1 - глинисто-карбонатные породы нижнего палеозоя; 2- породы кристаллического фундамента; 3 - дайки и силлы долеритов; 4 - кимберлитовые породы трубки; 5 - «плавающие рифы» вмещающих пород; 6 - туфогенно-осадочные образования кратера; 7 - дайки, жилы кимберлитов; 8 - зоны дробления, трещиноватости.

Разные трубки одной группы формируются в разные (Мир и Спутник) или в один этап (западное и восточное тела трубки Удачная и др.).

Коренные месторождения алмазов, рентабельные для освоения и разрабатываемые в настоящее время, отнесены исключительно к кимберлитовому типу — кимберлитовым и лампроитовым породам, выполняющим преимущественно трубки взрыва. К промышленному коренному месторождению относят рентабельные для разработки группы из двух-трех сближенных кимберлитовых тел» одиночное тело или рудный столб в трубке с близким набором разновидностей руд или рудами однородного состава, сформированными в одинаковых геолого-тектонических условиях. В общем мировом производстве природных алмазов (более 40 млн. карат в год) доля коренных месторождений превалирует и составляет 75-85%. Основные запасы алмазов сосредоточены в уникальных и крупных по размерам трубках взрыва и главным образом в эруптивных брекчиях их диатремовой части. Интрузивные кимберлиты глубоких

горизонтов диатрем, подводящего канала и отдельных самостоятельных даек, жил имеют подчиненное» второстепенное промышленное значение.

Формирование коренного месторождения, заполнение трубки взрыва кимберлитовыми породами происходит неоднократно в сближенные и незначительно разобщенные во времени фазы внедрения, которым отвечают близкие и разные по составу и алмазоносности руды.

Границами месторождения служат обычно границы трубки с вмещающими породами, реже границы руд главных фаз (или этапов) внедрения. Контакты рудных тел месторождений с вмещающими породами преимущественно четкие, резкие. На участках интенсивного дробления, брекчирования вмещающих пород контакты менее четкие.

Вмещающие осадочные породы и околотрубочном пространстве дислоцированы, вблизи контакта частично изменены: уплотнены, доломитизированы, ок-ремнены и содержат тонкие прожилки, жеоды, выполненные преимущественно кальцитом, магнетитом, пиритом и кварцем. Дислокация околотрубочного пространства выражается в образовании куполовидных блоковых структур (Рис. 1.3) и зоны дробления, интенсивной трещиноватости вмещающих пород. Куполовидные поднятия, иногда с мелкими опущенными блоками и брахискладками, имеют округлую и вытянутую вдоль длинной оси сечения трубки форму, размеры обычно двух-трех диаметров трубки, амплитуду до первых десятков метров и углы падения $30-80^\circ$ вблизи трубки и $5-10^\circ$ на удалении.

Размеры и амплитуда этих магматогенных структур с глубиной уменьшаются, восстанавливается первичное горизонтальное залегание пород.

Трещиноватость вмещающих пород околотрубочного пространства преимущественно концентрическая и радиальная, наиболее интенсивная в пределах купола вблизи трубки и уменьшается с удалением от нее. Непосредственно возле контакта с трубкой в зоне мощностью обычно 0.5-3 м (редко до 30 м) вмещающие породы раздроблены вплоть до образования брекчий, слои воздымаются вверх (углы $10-40^\circ$), реже наклонены.

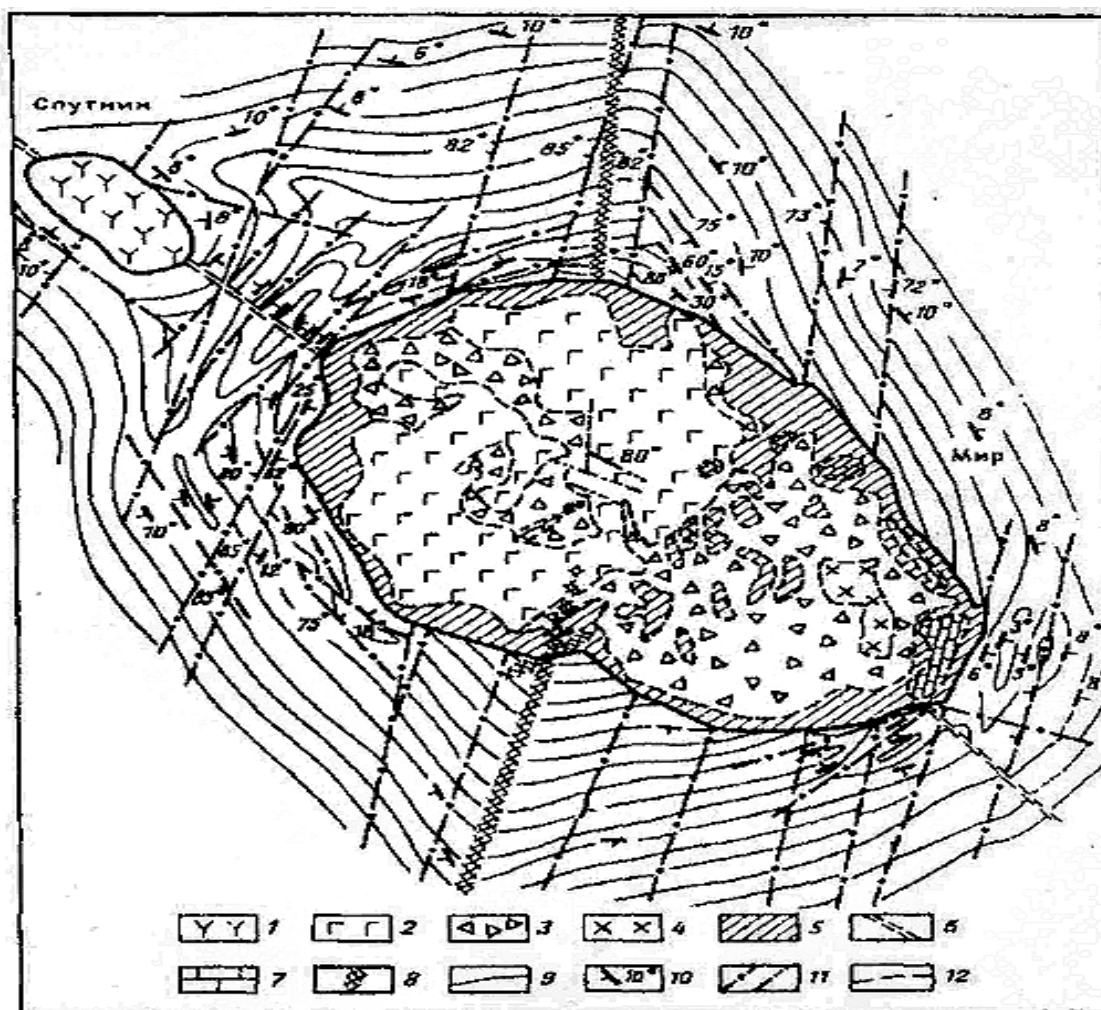


Рис. 1.3. Структура месторождения трубки Мир (по данным ГОК):

- 1 - кимберлитовые брекчии трубки Спутник; 2 - кимберлитовые брекчии первого этапа; 3 - кимберлитовые брекчии второго этапа; 4 — кимберлиты третьего этапа; 5 - эндоконтактные кимберлитовые брекчии; 6 - кимберлитовая жила Мир; 8- ксенолиты осадочных пород; 9 - изолинии залегания пластов осадочных пород; 10 - элементы залегания; 11 - дизъюнктивные нарушения (а - во вмещающих породах, б - и кимберлитах); 12 — контакты между разновидностями кимберлитовых пород

Зона дробления вмещающих пород с глубиной уменьшается почти до полного исчезновения.

Наибольшая изменчивость формы и размеров характерна для кратера и раструбов диатрем в верхней их части, а также на глубоких горизонтах, где появляются штокообразные тела интрузивных кимберлитов, диатремы переходят в дайки или жилы с раздувами (Рис. 1.4).

Раструб трубки имеет протяженность на глубину обычно 150-300 м, иногда он полностью эродирован, и трубки представлены цилиндрической или конусообразной частью (трубка «Дальняя»). Раструб чаще асимметричный, углы падения контактов относительно пологие ($20-70^\circ$) и изменяются как по периметру, так и с глубиной.

Участки между раструбом и местом перехода диатрем в дайку или жилу с раздувом, прослеживаются на глубину от 100 до 1000 м в зависимости от формы тел. Небольшая их протяженность характерна для сильно вытянутых линзовидных, дайкообразных тел с каналом трещинного типа, большая - для относительно изометричных тел с каналом центрального типа на пересечении разнонаправленных трещин. В грушевидных, неправильной линзовидной формы телах канал смешанного центрального и трещинного типов, протяженность диатрем больше в раздувах, меньше на зауженных участках тела.

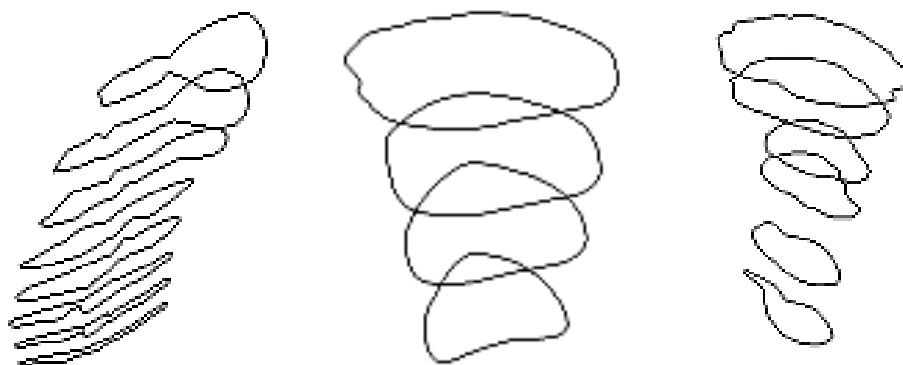


Рис. 1.4. Контуры кимберлитовых трубок на разных глубинах:
1-Ботуобинская, 2- Зарница, 3- Мир

В целом форма трубочных тел меняется в зависимости от величины эрозионного среза, типа канала и числа фаз внедрения кимберлитовых пород. Относительно простые овальные и округлые, близкие к изометричным (отношение длинной оси сечения к короткой 1:1—3:1) формы сечения характерны для одноканальных трубок взрыва с каналом центрального типа. Падение (склонение) диатрем крутое, форма относительно выдержанная: округлая и овальная формы с глубиной могут чередоваться, а в прикорневой части сменяться грушевидной (Мир на глубине более 600 м). Это наиболее распространенные формы горизонтального сечения коренных месторождений в трубках (Мир, Интернациональная, Дачная).

Сложные сдвоенные, гантелевидные неправильные формы горизонтального сечения (отношение осей обычно 2:1-5:1) присущи месторождениям с двумя сопряженными, иногда расходящимися на глубине каналами центрального, реже центрального и трещинного типов (трубки Новинка, Удачная, Сибирская, Юбилейная), отвечающими двум основным этапам внедрения. В случае расходящихся с глубиной каналов при значительном эрозионном срезе месторождение распадается на два рудных тела относительно простой выдержанной формы, которые с поверхности можно разрабатывать одним карьером. Месторождения подобной сложной формы менее распространены, но по запасам руды не уступают простым.

Очень сложные, сильно вытянутые (отношение осей 5:1 и более) линзовидные, дайкообразные с раздувами формы горизонтального сечения характерны для месторождений с каналами трещинного и смешанного трещинного и центрального типов (трубки Заполярная, Якутская, Сытыканская, Айхал). Месторождения невыдержанные и весьма невыдержанные по морфологии с изменчивым, участками крутым и пологим

падением контактов, как к центру, так и от центра рудного тела. Раструб сложных очертаний сравнительно быстро сужается и обычно на глубине до первых сотен метров переходит в дайкообразный (отношение осей 10:1-30:1) канал или жилу с раздувами (Айхал на глубине 200 м). Раздувы и пережимы дайкообразных месторождений обусловлены линейным расположением руд разных фаз (этапов) внедрения, сопряженных или расходящихся с глубиной каналов. Подобные месторождения по распространенности занимают второе место, по запасам руды - третье.

Месторождения по морфологии подразделены на три группы: 1) относительно простые, выдержанные, близкие к изометричным с одним каналом центрального типа, 2) сложные, невыдержанные, удлиненные с двумя каналами центрального типа, 3) очень сложные, весьма невыдержанные, линзовидные и дайкообразные многоканальные с трещинным и центральным типами каналов. Попытки морфологической классификации трубок по степени удлиненности горизонтального сечения, отношения длинной оси к короткой, нельзя признать удачными, так как необходимо учитывать типы и число возможных каналов, чтобы надежно и рационально разведать месторождение.

Алмазоносность кимберлитовых пород трубок не зависит от их формы, высокоалмазоносными могут быть как близкие к изометричным, так и сильно вытянутые, линзовидные тела.

Размеры трубок, площади их горизонтального сечения варьируют в широких пределах от первых сотен до 2 млн.м². Распределение трубок по площади характеризуется сильной положительной асимметрией и не противоречит логичной модели. Преобладают (около 70%) трубки малых размеров и промышленные месторождения среди них встречаются редко. Трубки средних размеров площадью 10-50 тыс.м² имеют подчиненную распространенность.

Крупные трубки площадью 50-250 тыс.м² мало распространены, но доминируют среди промышленных месторождений. Очень крупные по размерам трубки площадью более 250 тыс.м² очень редки, но часто уникальны по запасам.

С глубиной площадь горизонтального сечения трубок уменьшается неравномерно: быстро (в 2-3 раза) в выположенном раструбе и относительно медленно (в 1.2-2 раза) в крутопадающей более протяженной части диаметра. При этом сужение контура трубок происходит преимущественно по направлению короткой оси сечения, в связи с чем с глубиной отношение длинной оси к короткой нередко увеличивается.

В алмазоносных кимберлитовых полях между площадью сечения трубок и содержанием алмазов нами была установлена слабая, но значимая положительная статистическая связь, указывающая на более высокую вероятность повышенных содержаний среди крупных трубок и наоборот.

Внутреннее строение кимберлитовых трубок сложное, что обусловлено механизмом их формирования, присутствием руд разных фаз внедрения, по разному насыщенным ксенолитами и измененных пород.

В кратерной части трубок наблюдаются переотложенные так называемые вторичные кимберлитовые туфобрекчии, туфопесчаники с преобладанием пирокластического материала в нижней пачке и туфогенно-осадочного с обломками преимущественно вмещающих пород в верхней пачке пролювиально-озерного генезиса. Мощность пачек чаще 20-50 м и более. Пласты, линзы имеют субгоризонтальное и пологонаклонное залегание.

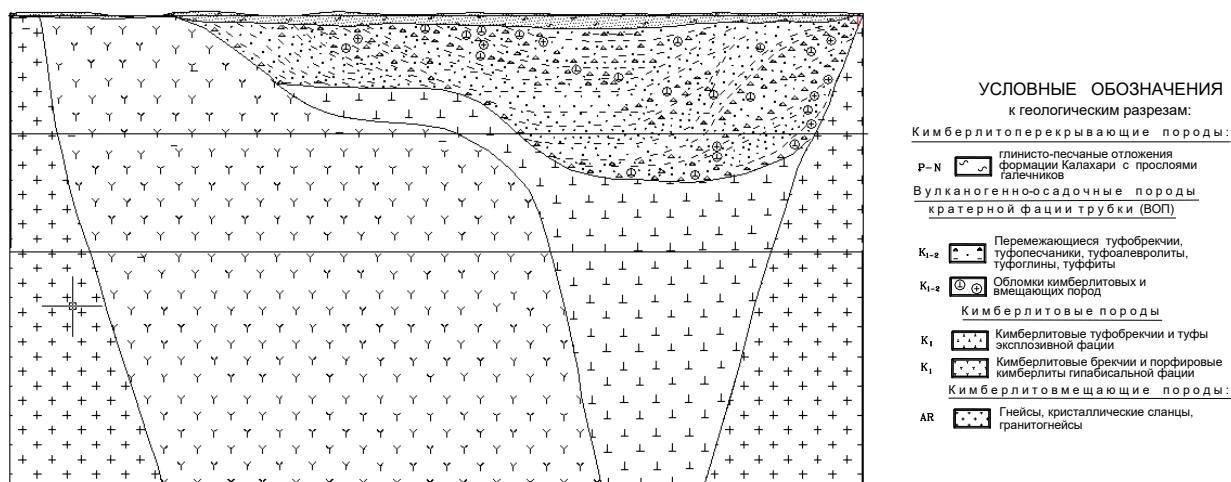


Рис. 1.5. Продольный геологический разрез месторождения алмазов трубка «Камачия»

Наиболее сложное внутреннее строение месторождений характерно для трубок, сформированных в несколько фаз внедрения (см. Рис. 1.5). Первичная форма и размеры инъеций ранней фазы могут быть значительно изменены последующими инъециями: руды ранних фаз частично (остаются блоки) или полностью замещаются рудами поздних фаз. При внедрении каждая последующая разновидность руд может расщепляться в верхней части, образуя неправильные жилообразные инъекции в кимберлитовых породах более ранних фаз внедрения. Относительно простое внутреннее строение месторождения сложено кимберлитовыми породами главным образом одной фазы внедрения. Однако и в таких относительно однородных месторождениях (трубка «Интернациональная») наблюдаются блоки пород ранней генерации, с глубиной изменяется количество и (или) размеры ксенолитов, включений автолитов. количество которых увеличивается.

Границы руд различных фаз внедрения обычно достаточно четкие, фиксируются изгибами контура по периметру.

Крупные трубки площадью 50-250 тыс.м² мало распространены, но именно они доминируют в качестве базы промышленных месторождений. Очень крупные по размерам трубки площадью более 250 тыс.м² очень редки, но часто уникальны по запасам.

С глубиной площадь горизонтального сечения трубок уменьшается неравномерно: быстро (в 2-3 раза) в выположенном раструбе и относительно медленно (в 1.2-2 раза) в крутопадающей более протяженной части диатрема. При этом сужение контура трубок происходит преимущественно по направлению короткой оси сечения, в связи с чем с глубиной отношение длинной оси к короткой нередко увеличивается.

Кимберлитовые породы близких по времени фаз внедрения обычно имеют нечеткие границы, постепенные переходы с ассимиляцией, смешением, образованием зон так называемых гибридных пород, мощностью до первых десятков метров, нередко пятнистой окраски. При проведении границ типов руд учитывают различие их вещественного состава - главный признак разных фаз внедрения.

Кимберлитовые породы одной фазы внедрения, близкие по текстурно-структурным особенностям, вещественному составу, физическим свойствам и алмазонасности, сопоставимы с технологическим сортом руд. Кимберлитовые породы разных фаз

внедрения различаются по некоторым или по большинству перечисленных признаков. Разновидности пород близких фаз внедрения различаются главным образом по текстурно-структурным особенностям, количеству и размерам обломочного материала. Кимберлитовые породы главных, обычно удаленных во времени фаз внедрения, различаются по большинству признаков главным образом вещественному составу и алмазоносности руд и относятся к разным технологическим сортам.

Алмазоносность руд и ее изменчивость.

Параметры алмазоносности руд (содержание, количество, крупность алмазов, и их изменчивость) - главные факторы, определяющие методику оценки и разведки месторождений. Промышленная значимость месторождений в значительной мере зависит и от сортности алмазов, выхода ювелирных камней, цены 1 карата алмазов.

Содержание алмазов в рудах составляет обычно 0.1 -3 кар/т, средняя масса кристаллов - от нескольких миллиграмм до 0.2 карата, редко - 0,8 карат, выход ювелирных камней 5-50%, редко - 75% .

Распределение по содержанию, средней массе кристаллов алмазов и выходу ювелирных камней в кимберлитовых трубках неравномерное, характеризуется сильной положительной асимметрией.

Минимальные промышленные содержания, при которых рентабельно разрабатывают большинство зарубежных месторождений, 0.2-1.0 кар/т; редко месторождения с крупными (доминирует класс -8+4 мм) и преимущественно (50% и более) ювелирными алмазами разрабатывают при содержании 0.05-0.15 кар/т.

Относительно более высокая доля крупных и ювелирных камней свойственна месторождениям с низким содержанием алмазов, однако само по себе низкое содержание еще не свидетельствует о присутствии крупных ювелирных камней, необходимо крупнообъемное опробование. Качество и стоимость 1 карата алмазов в месторождениях с каналом центрального типа чаще являются относительно более высокими, чем в линзовидных, дайкообразных месторождениях с каналом трещинного типа.

Изменчивость алмазоносности в пределах месторождения может быть случайной и координированной (закономерной). Первая обусловлена случайным распределением гнездовых скоплений и отдельных зерен алмазов, в т.ч. крупных, а вторая - главным образом сменой руд разных фаз внедрения и разным количеством ксенолитов в горизонтальном и вертикальном сечениях месторождения.

Промышленными являются чаще все рудные столбы, слагающие месторождение, реже - отдельные, сложенные рудами одной из фаз внедрения.

Изменчивость алмазоносности в горизонтальном сечении месторождения, обусловленная сменой руд, прямо зависит от числа фаз внедрения, степени различия алмазоносности кимберлитовых пород разных фаз и максимально проявляется по направлению их смены, преимущественно вдоль длинной оси горизонтального сечения трубки. Месторождения относительно однородного строения и состава характеризуются относительно меньшей степенью изменчивости алмазоносности.

Кимберлитовые породы разных фаз внедрения могут быть близкими или существенно разными по алмазоносности, причем различие больше всего выражается по содержанию (количеству) алмазов и относительно меньше - по их гранулометрическому составу, морфологии и сортности.

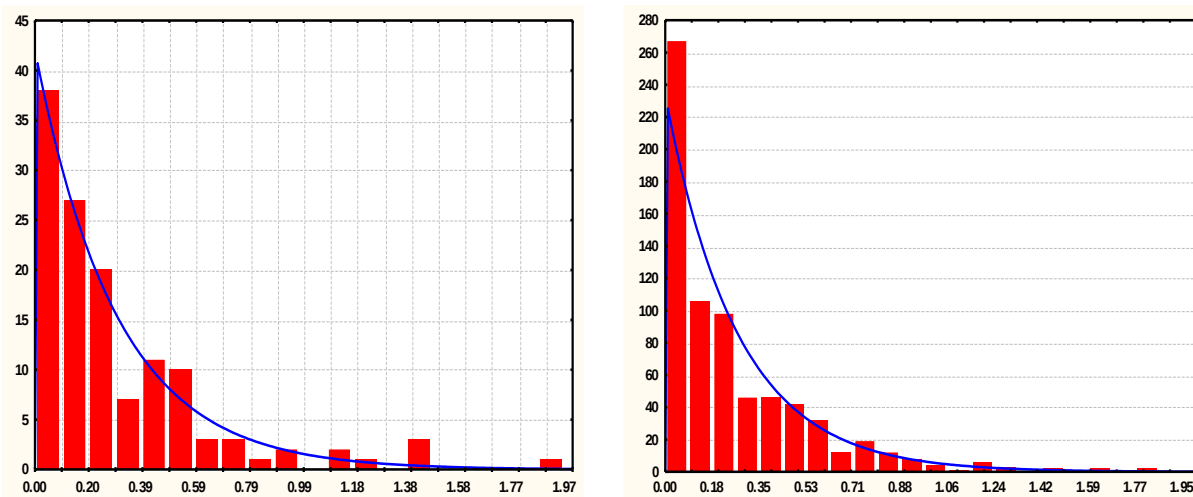


Рис. 1.6. Примеры распределения содержаний алмазов в пределах геологических блоков

Рудные столбы удаленных во времени фаз внедрения обычно существенно различаются по алмазности, близких по времени - незначительно и преимущественно только по содержанию алмазов.

Закономерной изменчивости алмазности руд последовательных фаз внедрения не наблюдается, относительно богатыми могут быть руды как ранних, так и более поздних фаз внедрения. В случаях концентрической зональности в размещении руд более алмазны центральные рудные столбы. Изменчивость алмазности вторичных кимберлитовых туфов, залегающих в основании кратера чаще случайная, прямо не зависит от алмазности подстилающих рудных столбов.

На изменчивость алмазности руд влияет содержание ксенолитов вмещающих пород. Зависимость содержания от количества ксенолитов отрицательная, что четко наблюдается при опробовании брекчий, или «плавающих рифов». Содержание алмазов в них ниже обычно на 10-30%, кристаллы относительно более мелкие, доля крупных алмазов меньше, чем в центральных частях. Однако, эта обратно пропорциональная зависимость выдерживается не везде и является не единственной причиной изменчивости уровня содержания алмазов даже в однородном рудном столбе.

Распределение алмазов в плане в пределах одного однородного рудного столба также неравномерное, представляет случайное чередование относительно богатых, средних и бедных по содержанию участков. Они обычно значимо различаются по количеству алмазов и незначительно — по их средней массе, т.е. относительно богатые участки обусловлены преимущественно скоплением алмазов, а не крупными алмазами. Преобладают участки с относительно бедным и средним уровнем содержания, богатые редки. Закономерного снижения с глубиной алмазности месторождений в целом также не установлено, однако известны случаи, когда изменчивость содержания алмазов значительная, скачкообразная и обусловлена появлением с глубиной разновидностей руд поздних, в т.ч. интрузивных фаз внедрения (Удачная глубже 400 м, Мир - 700 м и др.). По 15-метровым эксплуатационным горизонтам изменчивость параметров алмазности с глубиной проявляется менее резко, что объясняется главным образом постепенным перераспределением объемов руд разных фаз внедрения и случайными колебаниями. При резкой смене руд изменчивость скачкообразная [5, 81].

ГЛАВА 2.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

2.1 МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ

Последовательность и детальность компьютерного моделирования рудных тел может существенно варьироваться в зависимости от генетического типа и морфологических особенностей месторождения, полноты и достоверности геологоразведочных данных, проектных или производственных требований к точности оценки качества и количества запасов. Однако в целом последовательность операций может быть представлена в виде следующей схемы:

В соответствии с формализованной постановкой задач обработки данных (распознавание, классификация, моделирование, оценивание и прогнозирование) структура программного обеспечения для геолого-промышленной оценки месторождений включает:

- методы статистического анализа геотехнологических показателей в недрах и рудопотоках;
- методы теории случайных функций, геостатистического анализа (методы взвешивания с учетом анизотропии) и оценки геотехнологических показателей в недрах (дискретный, случайный и универсальный кригинг);
- оптимальная статистическая экстраполяция, экспоненциальное сглаживание, метод адаптивной авторегрессии, адаптивная селективная модель, адаптивная полиномиальная модель, адаптивный метод множественной регрессии, метод авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего;
- метод главных компонент, факторный анализ, кластерный анализ, дискриминантный анализ, дисперсионный анализ;
- методы стохастической геометрии и стереологической реконструкции пространственных объектов по их одномерным и двумерным сечениям;
- методы горно-геометрического моделирования размещения геотехнологических показателей и оконтуривание горно-геологических объектов.

При постановке и решении задач геологического обеспечения горного производства необходимо учитывать особенности специфику сбора и обработки геолого-маркшейдерских данных. Основными из них являются следующие:

- носителями первичной информации выступают пробы или разведочные пересечения, характеризующие в пространственной привязке качественные и структурно-морфологические параметры месторождения;
- различная сеть опробования (равномерная, неравномерная);
- сложность и многообразие форм визуализации как первичных, так и расчетных данных;
- необходимость преобразования структуры графических изображений (вычленение, схематизация, детализация);
- выбор вариантов исходных данных для решения задачи («данные – интерпретация – геоинформационные объекты - параметры»).

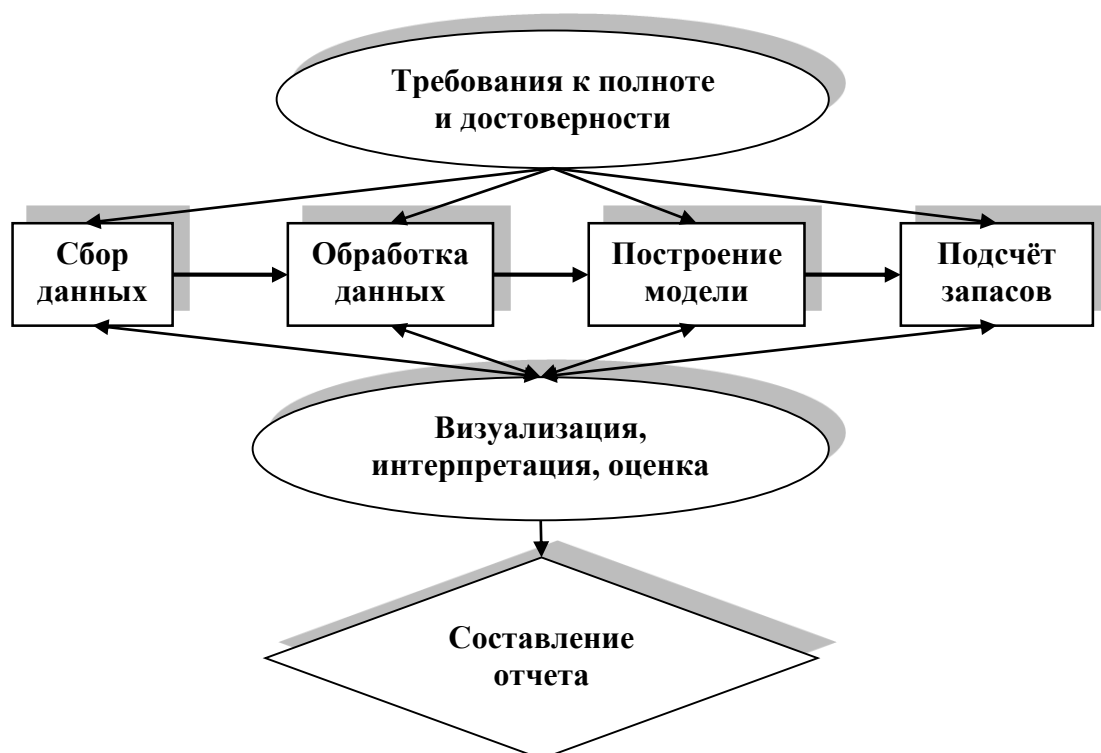


Рис. 2.1. Основные этапы моделирования месторождений

Вслед за принятием геологом решения о правильности и надежности выделения однородных геотехнологических зон возможен переход к оценке объемно-качественных характеристик выявленных горно-геологических объектов. Комплекс задач подсчета запасов реализуется с помощью последовательности процедур, образующих проблемно-ориентированные программные модули следующего состава:

- расчет координат точек траектории скважин по данным инклинометрии;
- расчет координат характерных точек скважин (геологических границ, границ интервалов опробования);
- расчет координат скважин на горизонтальных сечениях;
- расчет координат характерных точек скважин в проекции на заданную плоскость;
- выделение интервалов типов и сортов руд по качественным признакам с учетом кондиций на мощность выделяемых интервалов;
- выделение рудных интервалов по количественным характеристикам с учетом кондиций на содержание и мощность;
- расчет среднего содержания полезных компонентов в рудных интервалах;
- расчет линейных запасов полезных компонентов в рудных пересечениях;
- расчет пространственных и качественных параметров разведочного сечения или профиля;
- подсчет запасов полезных ископаемых в геологических или эксплуатационных блоках;
- сводный подсчет запасов полезных ископаемых по типам и сортам руд, рудным телам и месторождению в целом.

Координирующим элементом структуры компьютерной технологии геолого-промышленного обеспечения управления качеством руд в системе «месторождение - малоотходная технология - техногенное месторождение», на основе которого реализуются указанные процедуры, является базовый комплекс задач компьютерного моделирования месторождения по данным детальной и эксплуатационной разведок, эксплуатационного опробования и малообъемного технологического опробования.

Сложность и специфичность структуры геотехнологической информации, условий ее получения, преобразования и использования предопределили необходимость создания соответствующего проблемно-ориентированного банка данных.

Целевое назначение системы геолого-промышленного обеспечения управления качеством руд определяет следующий примерный состав информационных моделей, на основе которых формируются технологические карты обработки геологических данных в интерактивном режиме:

- модели размещения геотехнологических показателей в массиве;
- модели динамических рядов геотехнологических показателей (оперативные данные по добыче, рудоподготовке и обогащению);
- модели изменчивости качества руд и их обогатимости по уровням формирования рудопотоков;
- модели ситуационного моделирования по участкам месторождения (геотехнологические, геоэкологические зоны, зоны контрастности и т. д.) и распознавания производственных ситуаций;
- модели прогнозирования геотехнологических показателей в заданных объемах, по направлениям ведения горных работ и уровням рудопотоков;
- модели состояния запасов;
- модели статистического регулирования и оперативного планирования качества руд.

Специализированная ориентация компьютерной технологии на горно-геологические проблемы на содержательном уровне определяет необходимость решения следующих иерархически взаимосвязанных методических задач:

- анализ содержательной постановки задачи, результатом чего является установление адекватности сформулированных целей и полученных выводов;
- формализация исходной информации задачи на основе диалога, уточняющего отдельные компоненты задачи;
- выбор и конструирование способа решения формальной задачи, результатом которой является компьютерная схема обработки данных;
- контроль процессов решения задачи на основе анализа и предварительной интерпретации промежуточных результатов с внесением, в случае необходимости, корректирующих воздействий на предыдущие этапы;
- интерпретация конечных результатов, позволяющая геологу убедиться в адекватности их содержательной трактовки.

Интегрированное горно-геологическое программное обеспечение помогает автоматизировать большинство рутинных операций по интерпретации и обобщению разнородной пространственной информации. При оценке запасов месторождений необходимо выполнить следующие важнейшие операции:

- Формирование структуры базы данных
- Заполнение базы данных исходной геолого-маркшейдерской информацией
- Обработка первичных данных и выполнение статистических расчётов
- Анализ изменчивости геологических показателей
- Прогнозирование показателей переработки по данным опробования
- Выделение технологических сортов и составление композитных проб
- Моделирование рудных тел и зон минерализации
- Подсчёт запасов полезного ископаемого и ценных компонентов
- Оценка погрешности подсчёта запасов
- Представление отчета

Отмеченная общая последовательность операций должна обеспечивать достоверный подсчёт запасов как с учётом технических погрешностей получения исходных данных, так и по причине природной изменчивости геологических показателей в недрах. Таким

образом, на основании полученного отчёта открывается возможность принятия обоснованных решений по извлечению запасов с наибольшей экономической прибылью для горнодобывающего предприятия при минимальном экологическом ущербе.

Представление геологического строения залежи с помощью сочетания множества геометрических фигур различной конфигурации позволяет достаточно точно характеризовать рудные тела и оценивать их объёмы и массу. Полезные ископаемые, залегающие в виде множеств рудных тел, ограниченных сложными геометрическими поверхностями вмещающих пород, описываются приближенно различными наборами более простых геометрических фигур – полигонами, сетями треугольников и многоугольников, тетраэдрами и полиэдрами, матрицами регулярных прямоугольных блоков.

Геостатистический подход к построению распределения показателей с возможностью оценивания дисперсии в блоках и определения ошибок подсчёта запасов также выполняется на сеточных или блочных моделях во многих программных продуктах.

Стохастическая имитация позволяют осуществить реконструкцию пространственного размещения множества рудных тел по результатам опробования вдоль профилей и разведочных пересечений. Используется для восстановления геологического строения между линиями или областями опробования (профили буровых скважин, бороздовое опробование горных выработок или обнажения).

По аналогии с векторным и растровым подходом к представлению данных цифровое моделирование месторождений подразделяется соответственно на два типа: *каркасное* и *блочное*. Если первый тип, иногда называемый геометрическим, выполняется без интерполирования, то второй основан главным образом на интерполировании геопоказателей в блоках. Однако если блочная модель строится заполнением каркасов рудных тел или на основе стохастической имитации кондиций

При **каркасном моделировании** геологические объекты описываются набором векторных линий: контурами границ, многоугольниками или полигонами и для трёхмерного случая – многогранниками или полиэдрами. В любом случае все грани геологических объектов представляют собой не что иное, как полигон или контур. Проекция разломов в плоскости сечений, линии водоразделов или бровки уступов при этом представляются в виде незамкнутых ломаных или полилиний, в ряде горно-геологических пакетов называемых стрингами. При традиционных способах моделирования каркасное моделирование выполнялось без применения компьютеров вручную с помощью отрисовки контуров рудных тел и вмещающих пород на планах и разрезах. Подсчёты запасов такими методами как геологических блоков, разрезов, треугольников и ближайшего района основаны на предварительном полигональном или каркасном моделировании месторождения.

При **блочном моделировании** всё пространство месторождения разбивается решеткой на блоки и для каждого блока в узле решетки вычисляются значения геологических показателей путём интерполяции или имитации значений исходных точек опробования. При интерполяции используются различные процедуры дистанционного взвешивания и геостатистики, которые практически невыполнимы без применения компьютеров.

2.1.1 ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Компьютерное моделирование больших горно-геологических объектов и оценка запасов месторождений сегодня невозможны без формирования и постоянного обновления базы данных (БД). Объёмы БД для подсчета и оперативного пересчёта запасов обычно составляют десятки и сотни мегабайт, а для детально разведанных и эксплуатируемых месторождений с пополнением информации объём может составлять гигабайты. Поэтому выбор формата хранения БД, её структуры и установление связей между таблицами играют важную роль для обеспечения надежности и быстродействия

последующих вычислений. В БД компьютерных систем геологического моделирования месторождений предусматриваются средства, позволяющие осуществлять:

- определение ошибок в записях при загрузке таблиц базы данных - контроль соответствия длины проб и разности интервалов опробования, проверка диапазонов изменения содержаний, поиск ураганных аномальных значений и пр.;
- анализ полноты исходного массива «объекты-параметры», в том числе выделение размытых объектов по характеристикам и по числу отсутствующих значений;
- выявление слабо меняющихся параметров по числу градаций значений и изменению масштаба измерения параметров;
- построение гистограмм распределения значений показателей и расчет усредненных характеристик для заполнения пропусков в исходных данных;
- формирование таблиц «объекты-параметры» в заданных границах горно-геологических объектов;
- удаление дублирующих свойств, корреляционный анализ и определение представительности обработки исходных данных;
- выбор информационной совокупности параметров, транспонирование таблиц «объекты-параметры» и нормализация данных.

По результатам всех этапов анализа данных формируется схема обработки данных на компьютере для решения конкретной функциональной задачи геологического обеспечения.

Создание базы геологических данных является начальным этапом для всех последующих операций по решению всевозможных горно-геологических задач. Настолько насколько тщательно и профессионально подготовлены исходные данные геологических исследований (расположение скважин на местности в виде координат их устьев; замеры инклинометрии для расчета положения их в трехмерном пространстве; геологическая документация скважин; результаты опробования горных пород на присутствие в них полезного компонента, и множество других факторов, отражающих характер, строение и условия нахождения геологического объекта) настолько продуктивно будут эти данные обрабатываться на ПЭВМ для получения необходимых результатов и успешного ее дальнейшего использования.

Различные стадии и условия горно-добычных работ на месторождениях, с одной стороны, требуют индивидуального подхода к созданию базы по каждому из месторождений и вмещающего его пространства, а с другой стороны, имеются блоки задач (блоки баз данных) являющиеся стержневыми и общими независимо от месторождений и без которых невозможно решение множества узкоспециализированных, более мелких профессиональных задач, возникающих в процессе, как горных, так и геологоразведочных работ на месторождениях.

Ниже излагаются основные общие принципы работы с системой горно-геологического моделирования Datamine. Начальным этапом является создание базы данных геолого-маркшейдерской информации на основании которой проводятся все остальные расчеты вплоть до планирования добычных работ любой степени детализации и управления рудопотоками.

Система Datamine- логически структурированная программа, в которую встроены различные специализированные процессы. Они связаны с основным пользовательским интерфейсом, используемым всеми процессами. Каждый процесс выполняет логическую функцию и все процессы доступны в любое время и могут запускаться при наличии необходимой исходной информации. Вся входная информация для работы процессов системы размещается в файлах, представляющих собой двухмерные таблицы со столбцами - в виде полей и рядами - в виде записей. Все файлы содержат описание данных, которые включают в себя пользовательские имена каждого поля (до восьми знаков длиной), его тип (буквенно-цифровой или цифровой) и другую информацию. Это описание используется всеми процессами для декодирования файлов; т.о. процессы не

зависят от данных и будут работать на любом файле, который содержит подходящие данные. Такой (не фиксированный) формат данных внутри системы Datamine является ее преимуществом перед большинством программных средств для горных предприятий. Все файловые структуры могут быть заданы пользователем, и однажды созданные, они могут быть сохранены для использования в будущем, что очень удобно в ежедневной работе. Файлы хранятся в реляционной базе данных системы Datamine независимо от того, являются ли они данными по скважинам, проверкой опробования, оцифрованными точками, моделью рудного тела или файлом чертежа обработки карьера. Работа с файлами осуществляется по средствам большого количества утилит, предусмотренных для ввода, редактирования, отображения на дисплее, объединения, корректировки и выделения данных, каждая из которых доступна для любого файла. Кроме этого, база данных не имеет ограничения по количеству файлов, каждый из которых имеет оригинальное имя, данное пользователем. Так как структура файлов системе Datamine совершенно не зависит от структуры файлов операционной системы, то разные базы данных могут содержать файлы с одинаковыми именами. В тоже время длина (количество строк) любого файла также не ограничена. Это возможно потому, что система Datamine имеет собственную страничную систему, которая разрешает выводить длинные файлы в блок памяти; программа процесса “видит” уже полный файл. Следовательно, “размер проблемы”, которая может управляться с помощью системы Datamine, зависит только от существующего дискового пространства и скорости процессора компьютера.

Представляется целесообразным работу по созданию базы данных разделить на три этапа:

- 1 этап - ввод в компьютер и проверка первичной геологической информации;
- 2 этап - организация созданных файлов в системе Datamine;
- 3 этап - первичная обработка в этой системе.

2.1.2 ФАЙЛЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЗОЙ ДАННЫХ

Для простоты работы и возможности постоянного пополнения данных, а также проверке введенной информации, база разбивается на ряд однородных объектов (раздельных файлов), отвечающих смысловой геологической нагрузке. Каждый файл представляет собой таблицу, в которой колонка (называемая полем) соответствует одному типу данных. Таким образом, первичная стержневая база данных будет состоять из нескольких файлов, каждый из которых содержит свой набор полей (колонок).

ЭТАП 1. Создаются следующие файлы.

1. *Файл координат устьев скважин содержит:*

- наименование скважины
- координата скважины X
- координата скважины Y
- абсолютная отметка устья скважины Z

Координаты X и Y должны быть математическими, а не геодезическими, в этом случае X и Y меняются местами.

2. *Файл замеров инклинометрии скважин должен отражать:*

- наименование скважины
- расстояние от устья скважины до точки замера инклинометрии. Первая точка должна быть в устье выработки.
- абсолютный магнитный азимут, измеренный в градусах по часовой стрелке от оси Y (соответствующее северному направлению на планшете). В случае, когда скважина вертикальная, азимут=0°.
- угол отклонения скважины от горизонтали; если скважина вертикальная, то угол принимается равным 90 градусам.

3. *Файл опробования горных пород, который обязательно должен содержать:*

- наименование скважины
- глубина начала интервала опробования по стволу скважины
- глубина конца интервала опробования общее содержание полезного компонента в породе, количественные данные по классам крупности алмазов.
- количество кристаллов класса крупности +8мм.
- общий вес кристаллов класса крупности +8мм.-
- содержание алмазов класса крупности +8мм.
- количество кристаллов класса крупности -8+4мм.
- общий вес кристаллов класса крупности -8+4мм.
- содержание алмазов класса крупности -8+4мм.

Аналогичным образом заносятся данные по классам крупности -4+2мм; 2+1мм; -1+0,5мм; -0,5мм. Как правило, по результатам опробования, многие из этих значений отсутствуют, в этом случае в таблице ничего не проставляется.

Если проводились измерения физических свойств пород, то сюда включаются данные замеров по:

- удельному весу
- крепости
- коэффициенту измельчения
- влажности
- пористости и другие

Кроме этого могут присутствовать данные по проценту выхода керна и любых других испытаний (газонасыщенность, битуминозность, проницаемость и т.п.). Необходимо отметить, что этот общий файл опробования в дальнейшем желательно разбить на два, где в одном будут данные по алмазам, во втором результаты физических измерений, при этом для простоты работы содержание алмазов по классам и общее содержание в пробе следует выделить в отдельный файл.

4. *Файл документации горных пород по скважинам содержит:*

- наименование скважины
- глубина начала документации выделенного интервала определенной литологической (стратиграфической) разновидности
- глубина окончания документации выделенной литологической (стратиграфической) разновидности
- цифровой или буквенный код породы, который будет соответствовать литологической или стратиграфической разновидности осадочной толщи, либо определенному типу петрографической разновидности магматических пород, их возрастные и генетические границы, при этом файлы стратиграфии и литологии лучше развести по разным.

Что касается кодирования горных пород, то здесь общепринятых положений не существует. При кодировании необходимо исходить прежде всего из комплекса геологических задач, а так же фактического материала, представленного в геологических отчетах, являющихся главными исходными документами. С другой стороны нужно учитывать особенности геологического строения (месторождение - куст - поле - провинция), в котором находится объект интересов - кимберлитовая трубка. Вмещающие терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя, являющиеся рудовмещающими, кодируются на уровне стратиграфического расчленения в порядке его ранга: отдел - свита - подсвита - пачка ровно на столько, на сколько произведено расчленение осадочной толщи в геологической колонке. Кодирование производится как цифровым, так и буквенным (символьным) способом. Магматические породы в алмазоносной провинции представлены двумя формациями - основным, двух возрастов и ультраосновным - кимберлитовым. Трапповые породы кодируются по возрастной принадлежности, а кимберлиты по тем разновидностям пород которые выделяются в

теле трубки. Здесь сложности возникают с идентификацией разновидностей кимберлита разных лет отработки и разных исполнителей. Отдельно выделяются внутри трубочные и оперяющие жилы.

Информацию в файл необходимо заносить так, как она отражена в геологической колонке, не стараясь ее сжимать в виде генерализации и укрупнения литологических разностей. Файл должен максимально отражать информацию по геологическому строению месторождения - куста - поля - провинции и зависит прежде всего от того какой комплекс геологических задач будет решать в процессе работы, где геологические вопросы выступают в виде прикладных моментов в решении горных, экономических вопросов и более крупных, таких как планирование производства горных работ.

5. *Файл географической поверхности месторождения и окружающего его пространства.* Он создается путем оцифровки на дигитайзере, либо через систему Autocad, либо непосредственно в систему Datamine.
6. *Файл погоризонтных планов месторождения,* по которым производился подсчет запасов и он создается также, как и файл поверхности.
7. *Файл геологической блокировки месторождения.*
8. *Файлы геологических разрезов.*

Каждый из первых четырех основных файлов на начальном этапе создается для удобства в электронных таблицах по выше предложенной структуре и последовательности внесения в таблицу данных.

ЭТАП 2. Этот этап создания базы геологических данных заключается в организации файлов в системе Datamine. Поскольку система Datamine универсальна и рассчитана на любые виды полезного ископаемого и различные типы месторождений, то ниже даются рекомендации для конкретного вида сырья и типа месторождения, т.е. кимберлитовая трубка-алмаз.

Находясь в самой системе производится перевод каждого из созданных файлов текстового вида в эту систему, чаще всего, используя определенный процесс, позволяющий одновременно создавать необходимые поля и затем вносить в них данные, хотя эти процессы можно развести и проводить в два этапа. Поочередно создаются файлы:

1. Координат устьев скважин
2. Инклинометрии скважин
3. Опробования горных пород
4. Документации горных пород

В завершении этого этапа производится сортировка каждого из файлов по полю номера скважин.

ЭТАП 3. После создания и сортировки файлов приступаем к этапу объединения четырех первых файлов в единый общий файл, без которого невозможны дальнейшие операции в системе Datamine для решения геологических задач. Создание единого файла проводится поэтапно определенными процессами системы.

1. Объединение файлов опробования и документации по полям: номер скважины, интервал, при этом создается промежуточный файл, в котором каждому из опробованных интервалов горных пород присваивается имя в виде кода породы.
2. Следующим процессом объединяем файл координат устьев скважин и промежуточного файла образованного первым процессом по полю номера скважины. В этом случае создается второй промежуточный файл, где происходит присвоение местоположения каждой скважине с опробованием.
3. Третьим процессом объединяются второй промежуточный файл и файл инклинометрии скважин по полю номера скважин, т.о. этим процессом производится расчет истинного положения каждой пробы в трехмерном пространстве, используя координаты устья скважин, глубину расположения каждой пробы и данные по инклинометрии скважин. В результате получаем

выходной файл, в котором для каждого центра пробы рассчитываются координата X, Y, Z. Этот третий процесс обязателен и для случая, когда скважина вертикальная, а файла инклинометрии скважин не существует, в этом случае процесс проводится только с одним входным вторым промежуточным файлом, а второй входной файл не вводится. После этого процесса создается файл стандартного формата, который будет использоваться множеством других процессов в системе Datamine.

На схеме (рис.2.2) пунктиром обозначаются процессы в системе Datamine работающие на данном этапе. Полученный таким образом файл скважин готов к применению в дальнейших процессах обработки геологической информации. Файл скважин содержит пространственные координаты центра опробования, результаты опробования, литологию в виде кодирования пород, как в символьном виде,

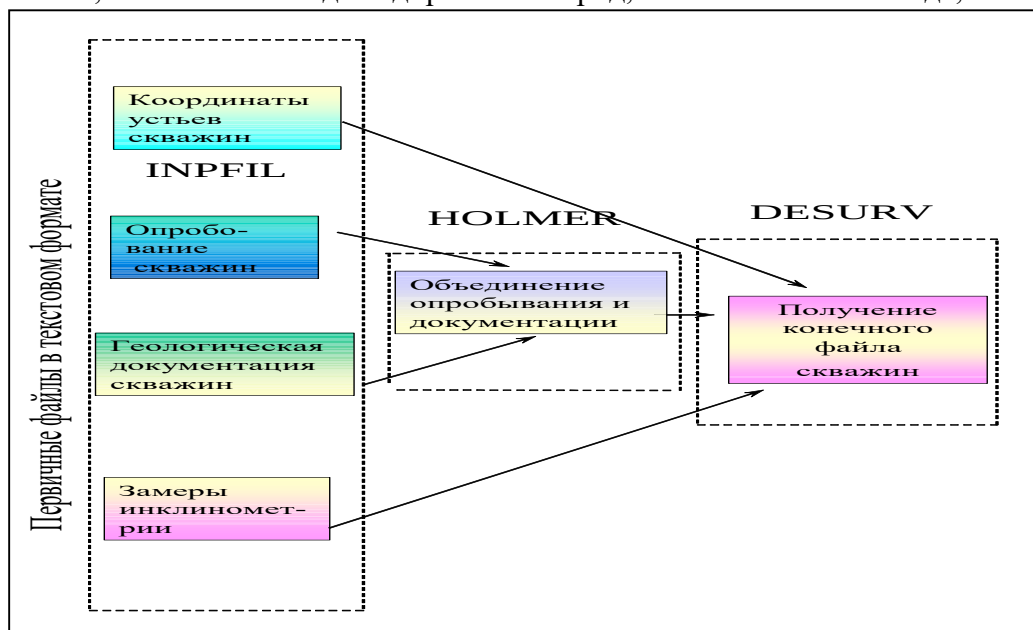


Рис. 2.2. Схема процессов первичного ввода и обработки геологической информации

так и в цифровом, необходимые данные физико-механических свойств и т.д. Пример расчета представлен на Рис. 2.3.

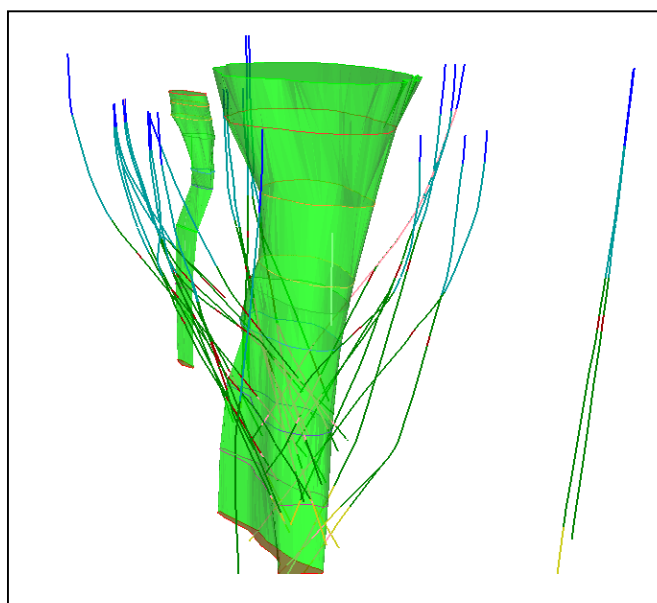


Рис. 2.3. Контурные рудного тела и горные выработки трубки «Мир»:

различным цветом выделены стратиграфические разновидности горных пород

На следующем Рис. 2.4 представлена обобщенная схема обработки исходных данных для создания геолого-математической модели месторождения трубки «Мир».

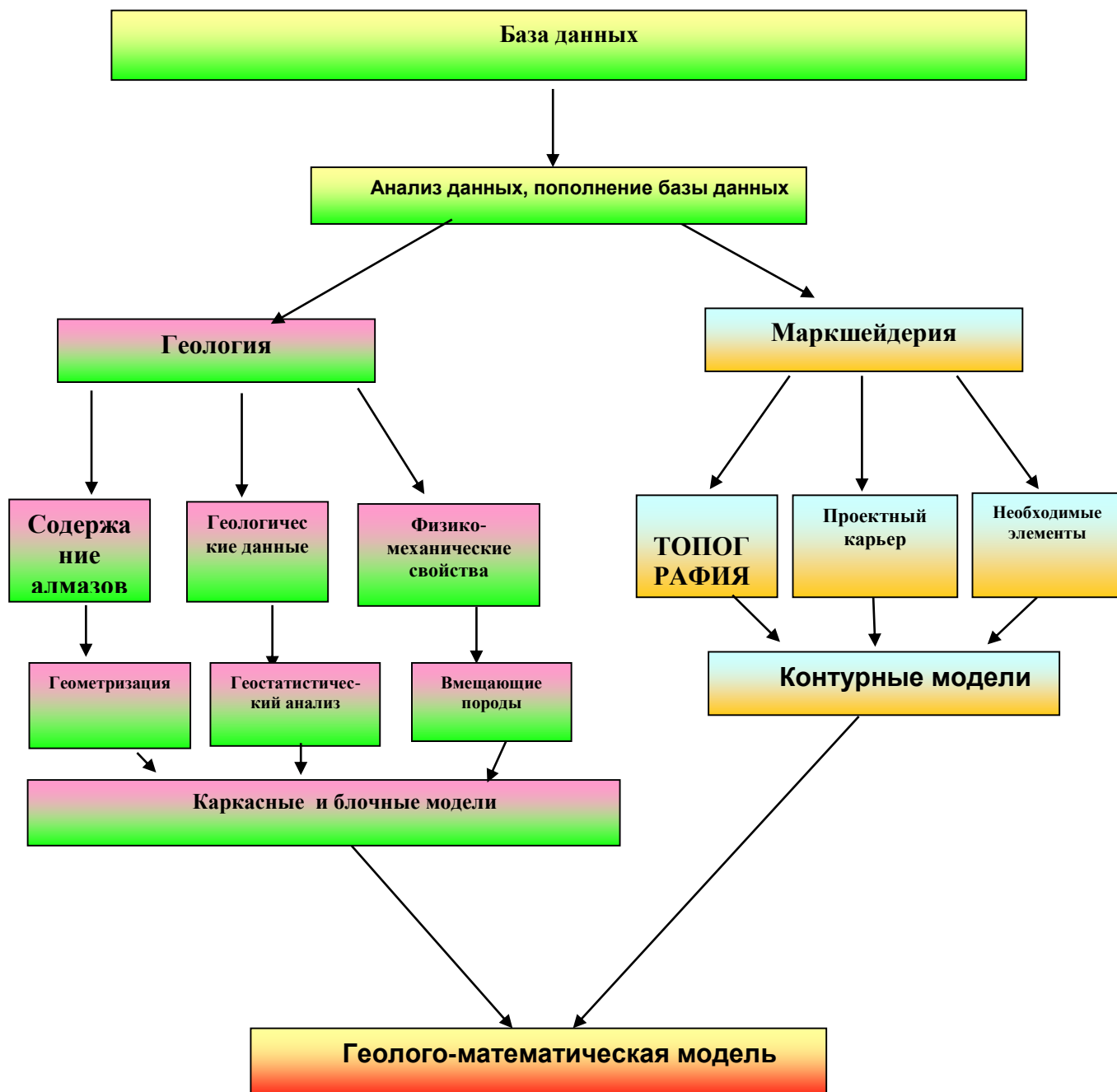


Рис. 2.4. Схема обработки данных при построении геолого-математической модели

2.1.3 КАРКАСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Следующим этапом, после ввода данных по скважинам, является каркасное моделирование. Каркасные модели используются для трёхмерного представления моделируемых минерализованных зон, геологических структур, поверхностей (таких, как дневная поверхность, разломы, зоны окисления и пр.) и других трёхмерных тел (например, подземные выработки, оболочки карьера и пр.) Кроме того, каркасные модели применяются при создании блочных моделей, кодировании данных опробования и любых данных с трёхмерными координатами.

Выделяют следующие разновидности каркасных моделей:

- сплошные или замкнутые модели (солиды),

- поверхности -
 - а) цифровые модели поверхности (ЦМП),
 - б) сложные поверхности.

Модуль цифрового моделирования рельефа создает триангуляционную модель поверхности. Она может быть впоследствии отредактирована; триангуляционная модель поверхности в дальнейшем используется при построении блочной.

Модуль твердотельного моделирования базируется на использовании интерактивного задания периметров и последующего построения на их базе каркасной модели, с высокой точностью определяющей структуру месторождения и т.п. Каркасная модель может быть просмотрена в изометрической проекции, скомбинирована с другими моделями, или конвертирована в блочную модель. Имеется возможность построения сечений; также существует блок вычисления объемов, что очень важно при оценке месторождения либо геологического блока, имеющего сложную геометрию.

Цифровая модель рельефа - средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов и карьеров) в виде трехмерных данных как совокупности высотных отметок или отметок глубин и иных значений аппликат (координаты Z) в узлах регулярной или нерегулярной сети, а также как совокупность записей изолиний. Наиболее распространенными способами цифрового представления рельефа является модель пространственных данных, аппроксимирующая рельеф многогранной поверхностью с высотными отметками (отметками глубин) в узлах треугольной сети.

Сегодня подобное моделирование представляет собой сочетание наук о Земле, геоинформатики и геостатистики и имеет много названий. Например, на Западе оно известно как количественный анализ рельефа, геоморфометрия или количественная геоморфология. Компьютерная обработка массивов данных по территории и цифровые модели рельефа произвели целую революцию и в корне изменили подход к двум основным функциям моделирования, таким как анализ и визуализация. Моделирование рельефа, его анализ и изучение по построенным моделям постепенно становятся неотъемлемой частью исследований в науках о Земле, в экологии и инженерных проектах. Компьютерная обработка пространственных данных находит широкое применение и при моделировании месторождений.

При моделировании рельефа необходимо рассматривать в плане создания географически правильного и наглядного изображения форм рельефа и его сочетаний на основе разностороннего и тщательного изучения. Созданию модели должно предшествовать детальное изучение рельефа, его анализ, установление типа рельефа. Величина интервалов сечения в каждой высотной зоне не должна быть больше относительной высоты крупных форм. Применяемые методы моделирования не должны нарушать точность и учитывать степень детальности на основе существующих данных. Поскольку существует прямая связь рельефа с элементами гидрографической сети, то эта сеть как одна из главных элементов содержания карт рельефа, находит отображение с детальностью, зависящей от площади и объема модели.

Качество цифровых моделей складывается в общем случае из информативности, точности, полноты, корректности внутренней структуры. Самым первым из этапов создания модели проекта является оцифровка. Под этим понимается приведение "бумажного" или какого-либо другого вида фактографического материала к единому, в рамках рабочей системы, формату векторных данных. Например, это может быть как сканирование и векторизация бумажного образца карты, так и ввод данных с дигитайзера. Целью оцифровки является создание модели с максимально возможной корректной топологией. Все недочеты, появившиеся в результате оцифровки, должны быть окончательно исправлены на следующем этапе - редактировании.

Цифровое моделирование рельефа заключается в построении модели, которая бы наилучшим образом отображала рельеф исследуемой местности. Эти процессы связаны с объемным моделированием и с задачами пространственного анализа. Иначе можно

сказать, что происходит переход от аналоговой модели непрерывной поверхности к дискретной модели набора точек, оптимально отображающих форму этой поверхности.

Триангуляция на нерегулярной сети - особый способ представления, заключающийся в описании поля в виде триангуляционной сети. Исходные нерегулярные узлы объединяются в треугольники посредством триангуляции. Триангуляция - это процесс создания смежных непересекающихся треугольников, вершинами которых являются исходные узлы. Наиболее часто используется триангуляция Делоне. Считается, что такая триангуляция образует наиболее "правильные" треугольники. Таким образом, непрерывное поле аппроксимируется кусочно-линейной поверхностью. Создание изолиний на основе триангуляционных нерегулярных сетей – самый быстрый способ создания изолиний. Однако, как правило, такие изолинии имеют ярко выраженные изломы и возникает задача их сглаживания. Для сглаживания изолиний в системе используется интерполяция параметрическими сплайнами.

Построение каркасных моделей кимберлитовых месторождений.

Наиболее точным способом описания геологических границ в трехмерном пространстве является создание каркасной поверхности или оболочки тела. Различие между ними состоит в том, что каркасное тело охватывает объем, а каркасная поверхность обычно открыта, не замкнута. Они могут также отличаться по способу построения. Применение каркасов обеспечивает большую точность, чем использование полигонов, но требует хорошего знания пространственного строения месторождения. Создание каркасов может быть более трудоемким. Отправной точкой каркасного моделирования является обычно создание серий полигонов, ограничивающих геологические объекты. Эти полигоны, контуры или периметры тел могут лежать в разных плоскостях и иметь различную ориентацию. Они не должны иметь самопересечений в трехмерном пространстве и не должны пересекаться с соседними контурами.

Обычная практика создания каркасных моделей кимберлитовых месторождений основана на использовании геологоразведочных отчетных данных, то есть на использовании контуров рудного тела для различных горизонтов. В этом случае с помощью дигитайзера вводятся периметры (внешние контуры) месторождения, по которым в интерактивном режиме отстраивается рудное тело. Это самый простой способ, который дает представление о пространственной морфологии месторождения. Такой метод возможен только в случае однородного, с литологической точки зрения, строения месторождения и горизонтальной геологической блокировки. То есть в этом случае выделение геологических блоков производится только по принципу детальности разведанности месторождения и не учитывает типы кимберлитов, участвующих в строении рудного тела и содержание полезного компонента.

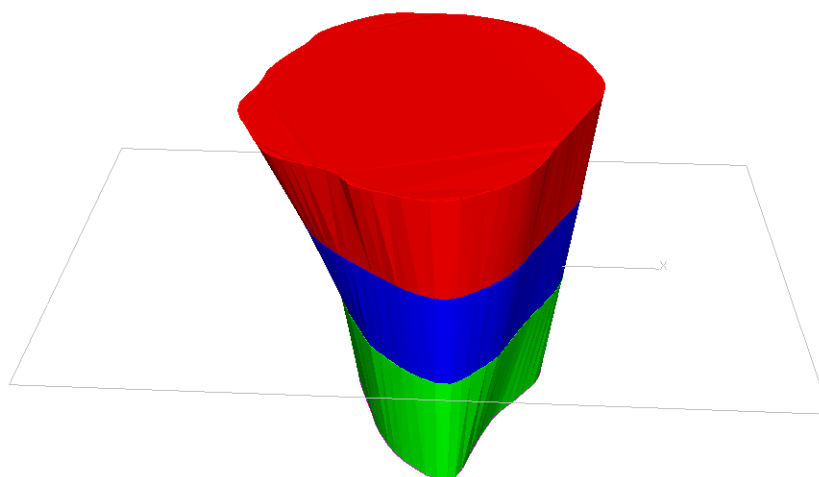


Рис. 2.5. Каркасная модель трубки «Зарница»

Тем не менее, строение кимберлитовых месторождений обычно имеет более сложную форму и в первую очередь это касается поверхности месторождения. В случае выхода на дневную поверхность построение каркасной модели создается с учетом топографии. Для этого создается файл топографической поверхности, который либо вводится с дигитайзера, если существуют данные, либо отстраивается по данным абсолютных отметок устьев скважин. Обычная практика – применение всех существующих данных для создания более точного строения рельефа в пределах проектируемого карьера.

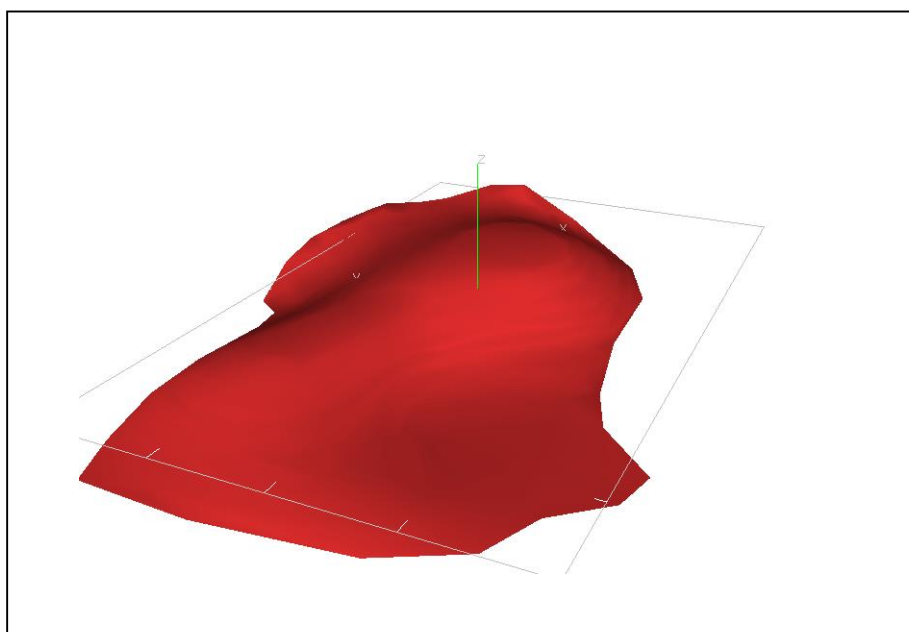


Рис. 2.6. Каркасная модель поверхности рудного тела

По существующим данным в автоматическом режиме создается цифровая модель поверхности, на которую проецируется линия верхней кромки рудного тела. В этом случае линия в каждой точке принимает значения абсолютных отметок топоповерхности. После этого повторяется построение цифровой модели, но только в пределах выделенной линии, соответствующей выходу кимберлита на дневную поверхность. В дальнейшем к каркасной модели, созданной по периметрам рудного тела, добавляется созданная модель поверхности.

Более сложная задача – построение поверхности кимберлитового тела, не выходящего на дневную поверхность. В этом случае используются данные горных выработок (точка входа в рудное тело и геологические разрезы). Используется также дополнительная информация в том числе и данные геофизики, несущие данные о строении поверхности месторождения. По данным геологических скважин отрисовывается контур месторождения, в пределах которых создается триангуляционная модель иногда довольно сложной поверхности. При необходимости исходные данные могут быть предварительно сглажены, с применением метода интерполяции. В любом случае, полученные данные должны быть отредактированы в соответствии с существующими исходными данными.

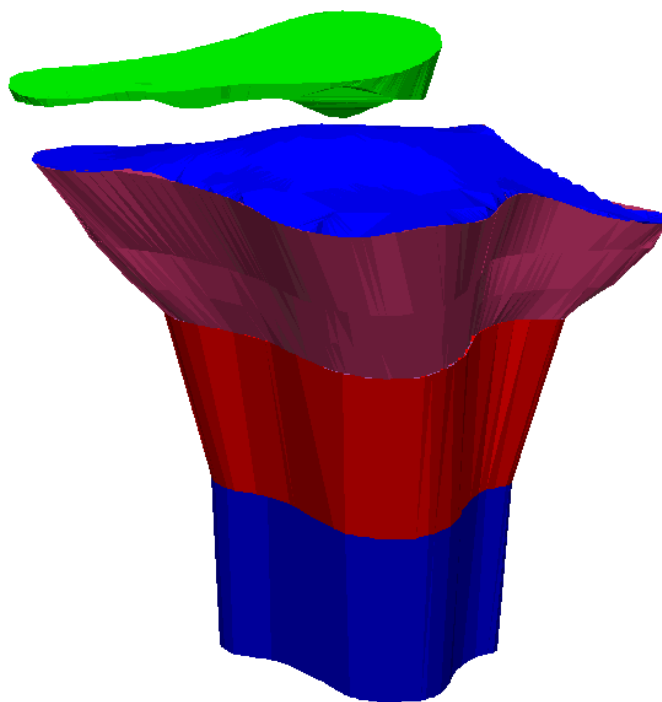


Рис. 2.7. Каркасная модель трубки «Комсомольская»

При построении каркасных моделей геологических блоков, литологических границ вмещающих пород используется трехмерный редактор, позволяющий работать со всей исходной информацией и достаточно точно создавать общую каркасную модель месторождения.

Немаловажным фактором применения каркасных моделей является возможность подсчета объема горной массы. Особенно это важно при оценке запасов месторождений либо геологических блоков, имеющих сложную геометрию. Обычные методы расчетов в таких случаях могут нести ошибку до 20% и более.

Создание каркасных моделей – один из важнейших этапов построения геолого-математической модели. В целом, подобная автоматизация структурно-геологических построений не только повышает оперативность геометризации геологических объектов, но и во многих случаях позволяет принципиально улучшить отражение реальной геологической ситуации создаваемой таким образом геолого-математической моделью. Последнее достигается, прежде всего, возможностью повышения обоснованности отстройки геологических границ в областях пространства, где отсутствуют данные о параметрах характеризующих их залегание, полученные в результате прямых геологических наблюдений при изучении керна и геологических данных или непосредственно в процессе интерпретации материалов геофизических исследований. Прикладная эффективность компьютерного моделирования существенно возрастает при проведении геологического доизучения, поскольку в этом случае в практический оборот

вовлекается огромное количество многоплановой, разномасштабной, а не редко и противоречивой информации, полученной в результате проведения работ разных лет и самой различной направленности. Данные такого рода нуждаются во взаимоувязке и непременно переосмыслении с единых позиций. По сравнению с обычно используемыми двухмерными представлениями геологических объектов, объемные модели обладают целым рядом существенных преимуществ. В частности, при формировании разреза объемной модели, оказываются учтенными не только глубины подсечений контактов находящимися на линии профиля или вблизи него скважинами (как это обычно происходит, когда изначально строятся плоские модели), но и характер залегания этих поверхностей в его окрестностях. Использование трехмерной цифровой модели любого геологического объекта при изучении его структуры гораздо эффективнее, привлечения для тех же целей плоских отображений в виде карт и разрезов, число которых всегда ограничено, в том числе и из-за трудоемкости их создания. Работа с цифровой моделью позволяет достаточно оперативно обеспечить широкий набор изображений объекта исследования в виде карт и разрезов произвольной ориентации и в любых комбинациях. Это обстоятельство дает возможность, путем последовательного перебора практически неограниченного числа вариантов представления модели объекта, относительно быстро выбрать и практически реализовать оптимальные их виды и ракурсы, определить значимые особенности его геологического строения. Квалифицированный выбор режима (или режимов) визуализации трехмерной модели позволяет получить объективные представления о внутреннем строении изучаемого объекта, облегчает выявление и анализ динамики пространственного изменения его вещественных, структурных или иных характеристик, задаваемых при моделировании.

Необходимо отметить, что недостаточная и в значительной степени неравномерная геологическая изученность характерная для месторождений не может не сказываться на информационной обеспеченности геологического моделирования и не оказывать влияния на сам подход к его выполнению. Система, предназначенная для объемного моделирования геологических объектов при подобном относительно существенном дефиците информации, должна быть ориентирована на возможность контроля и корректировки хода структурно-геологических построений на любом их этапе в интерактивном режиме, который в таких условиях начинает играть важнейшую роль. На данный момент времени, система позволяет создавать объемные математические модели геологических объектов, в том числе и при выклинивании пластов, на основе интерактивного подбора и корреляции геологических границ. Система позволяет визуализировать структуру отдельных фрагментов модели (пластов, границ и т.п.), а также результатов расчета разрезов модели любой ориентации, форма представления которых может быть выбрана произвольно, исходя из критериев наилучшей наглядности и информативности. Следует подчеркнуть, что область применения данной системы компьютерного трехмерного моделирования не ограничивается построением литолого-стратиграфических моделей геологических объектов. Система может быть эффективно использована при визуализации и анализе результатов интерпретации данных любых площадных геолого-геофизических или иных исследований при условии, что эти результаты представляют собой распределение какого-либо геологического или геофизического параметра по вертикали.

Помимо того, что каркасные модели позволяют строить более точные геологические модели, они имеют дополнительные преимущества перед контурными моделями.

Существует возможность сделать срез каркасной модели некоторой плоскостью. Срезы каркасной модели могут быть преобразованы в полигоны. Это дает возможность осуществить интерпретацию геологической структуры в одной плоскости и затем создать новый ряд контуров в плоскости с произвольной ориентацией. После заполнения каркаса регулярными блоками можно быстро вычислить объемы полученных каркасов

2.1.4 БЛОЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Процесс блочного моделирования включает в себя следующие предварительные операции:

1. Определение размеров модели.

Перед созданием пустой блочной модели, необходимо знать ее максимальные и минимальные размеры. Для этого определяются координаты (минимум и максимум) с учетом изученности района в пределах месторождения и возможных размеров проектного карьера.

2. Определение размеров блоков.

Со статистической точки зрения размер блоков в модели должен быть равен приблизительно половине густоты сети бурения. С другой стороны, размер блоков должен отражать геометрию рудной залежи ("вписываться" в геологию), и учитывать горно-технические требования отработки (минимальная горная мощность, внутренние и внешние границы и др.). Несмотря на то, что размер модели зависит от размера месторождения, очень большие модели не рациональны и для их обработки требуются значительные затраты времени.

3. Создание пустой модели.

Под термином "пустая модель" понимается пространство (прототип), заполненное блоками заданного размера. Модель названа "пустой", так как она еще не содержит в себе кодов или содержаний изучаемого признака или иных данных.

Цель геологического моделирования состоит в том, чтобы как можно точнее представить не только границы рудных тел и внутреннюю геометрию залежи, но также содержание и ценность полезного в пространстве месторождения.

Блочная геологическая модель складывается из прямоугольных блоков, имеющих свои атрибуты или показатели, такие как ценного компонента, тип породы, степень окисления и т.д.

Хотя для описания элементарных ячеек можно использовать различные геометрические формы, такие как полигоны, произвольные гексаэдры, аналитические математические поверхности и триангуляции, однако ни одна из них не является достаточно удобной в применении. Наиболее простая форма трехмерной модели строится на прямоугольной решетке. Это наиболее широко используемый тип модели, поскольку он позволяет выполнять самую оперативную обработку данных на компьютере и легко подсчитывать запасы путем суммирования частных значений в блоках.

На этой основе для многих типов рудных тел возможны решения проблемы описания качества и геологических границ. Однако всеобъемлющей системы моделирования требуется такой был бы применим без изменения к как можно более месторождений. Одно из решений состоит в том, чтобы использовать блочную модель с переменным размером

Размер блоков устанавливается исходя из таких факторов, как геостатистические свойства геологических показателей, расстояние между скважинами, горно-геологические ограничения, особенности топографии и мощность используемого компьютера. В том случае, если для создаваемой модели необходима высокая детализация, например, внутри слоев или на границах, существует возможность разбить исходные блоки на более мелкие.

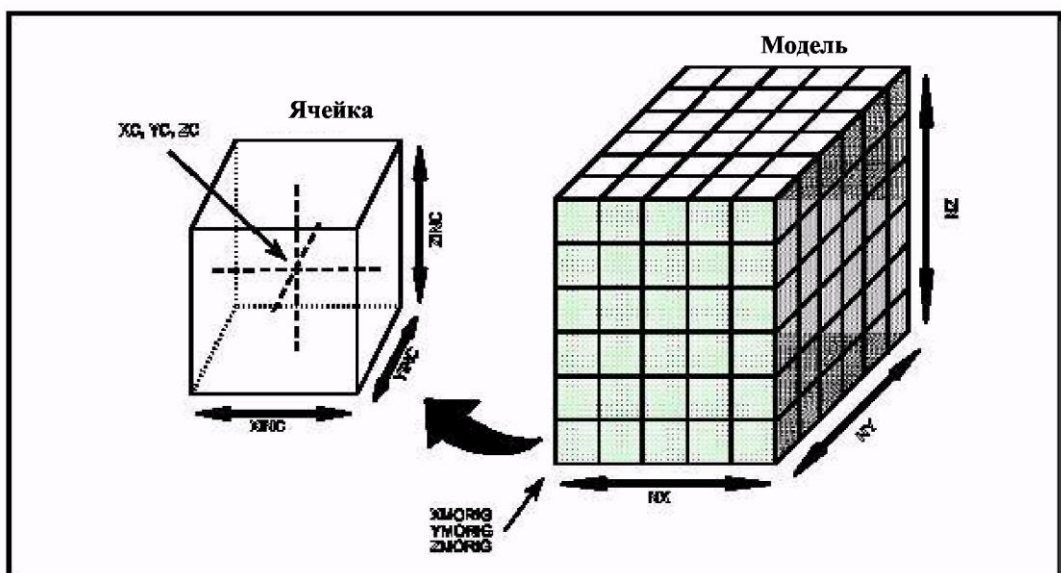
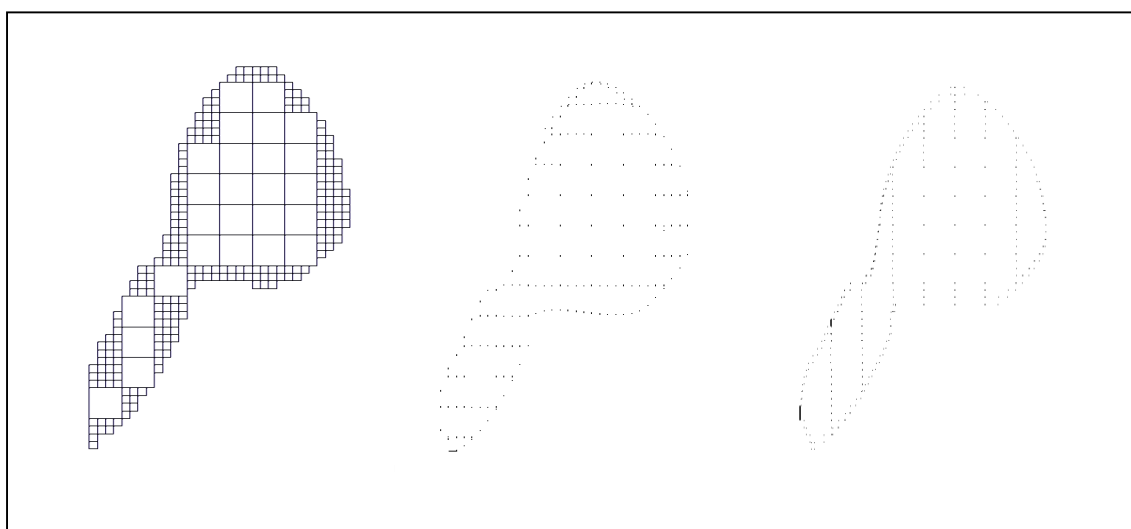


Рис. 2.8. Представление блочной модели в виде массива ячеек

Существенным преимуществом избирательного блочного моделирования является то, что нет необходимости создавать блоки в каждом узле модели. Достаточно смоделировать только интересующие области, такие как зоны минерализации в виде рудных тел.

Разбиение на блоки можно выполнить вдоль любой из осей модели. Когда вы используете ограничивающий контур, такой как периметр рудного тела или полигон каркасной оболочки, то вам надо задать в пространстве плоскость заполнения, чтобы контролировать направление разбиения на блоки. Например, задана в качестве плоскости заполнения плоскость XY , то данная процедура создаст заданное число блоков в X и Y направлениях. Вдоль третьей оси размер ячеек будет рассчитываться с использованием процедуры заполнения слоя. При этом размер блоков обычно задается так, чтобы блоки как можно точнее ложились по периметру или границе каркасной модели. Таким образом, аккуратный подбор заполняющей плоскости важен для более адекватного моделирования геологических границ.

Рис. 2.9. Каркас, заполненный ячейками в плоскости XY , YZ и XZ

Существует несколько методов, с помощью которых возможно создавать геологические модели. Выбор будет зависеть от геологической сложности, необходимой

степени точности, количества времени и доступных для моделирования программно-аппаратных ресурсов.

Самый быстрый способ построения модели состоит в создании блоков на основе процесса интерполяции. Для интерполяции необходимо иметь прототип пустой модели, загрузить данные опробования и ввести ряд параметров интерполяции. При выполнении данной процедуры просматриваются центры потенциальных блоков для выяснения того достаточно ли обнаружено проб в радиусе поиска. Если какие-то пробы не удовлетворяют условиям интерполяции, то процедура перемещается к следующему узлу без создания блока. Если же обнаружено достаточное число проб, удовлетворяющих требованиям интерполяции, то в данном узле создается ячейка модели и ей присваивается рассчитанное интерполяционное значение. Главное преимущество данного метода состоит в том, что не надо точно моделировать границы геологических структур. Эту методику можно использовать для моделирования простых слоистых структур, массивных месторождений, топографических поверхностей или там, где просто есть достаточное количество данных для выполнения детальной геологической интерпретации. Этой процедуре требуется пустая решетка полной модели или отдельного прямоугольного участка месторождения.

Чтобы обеспечить надежный контроль формы и положения пространственных объектов, необходимо учесть геологическую интерпретацию структур. Эта интерпретация может быть представлена в виде периметров, подчеркивающих различные границы, или, если нужна повышенная точность, включать наборы каркасных моделей поверхностей.

Для заполнения полигонов ячейками первые должны быть представлены как замкнутые области или периметры.

После загрузки полигонов в рабочую область необходимо их просмотреть и отредактировать. Проверка позиций полигонов и результатов оцифровки очень важна, поскольку неверные значения на данном этапе могут значительно повлиять на правильность итоговой модели. Методика проверки включает:

- Генерацию статистики полигонов
- Вывод позиций полигонов и значений атрибутов на плоттер
- Просмотр данных в трехмерном пространстве

Заполнение полигонов используется для заполнения замкнутых полигонов (периметров) ячейками. Эта процедура предполагает, что периметры пленарные и лежат в плоскостях 'XY', 'XZ' или 'YZ'. Если периметры не удовлетворяют каким-то из этих условий, то необходимо связать их вместе как каркас и заполнять этот каркас ячейками. Помимо заполнения полигонов ячейками, данная процедура создает блоки перпендикулярные плоскости, в которой расположены полигоны. Обычно расстояние проекции устанавливается равным половине расстояния между соседними сечениями. Результаты будут лучше, если сечения расположены ближе, а геологические структуры будут простирались примерно вдоль ортогональной оси. Иначе создаваемая модель может показаться крупно-блочной и плохо отражать фактическую геологию залежи.

Пример создания модели представлен на Рис. 2.10. В данном случае моделирование основано на следующих этапах:

- Ввод и редактирование контуров рудного тела месторождения (а);
- Создание каркасной модели (б);
- Определение прототипа, размеров ячеек и заполнение каркасной модели блоками;
- Интерполяция содержания алмазов в пределах рудного тела.

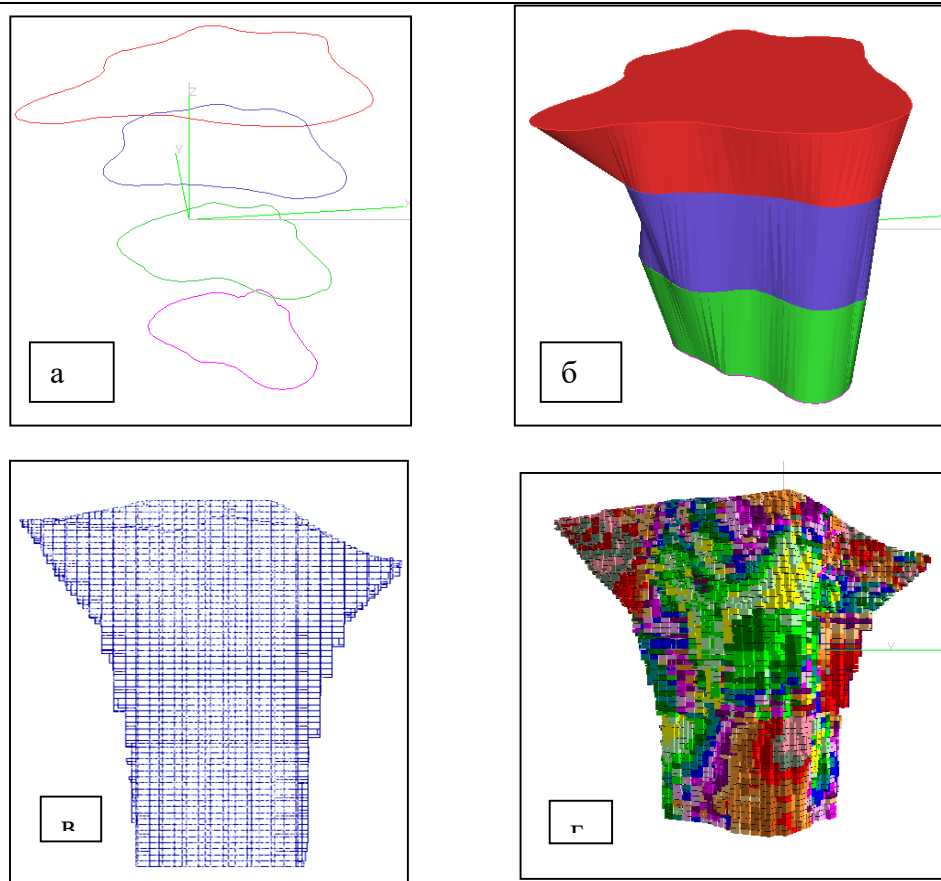


Рис. 2.10. Пример создания модели кимберлитового месторождения

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Комплексные геологические модели часто содержат отдельные структурные элементы, такие как литологические единицы, интрузии, топографические поверхности раздела и т.д. Работа с этими объектами и встраивание их в модель может оказаться трудоемким процессом и требовать больших затрат времени. Кроме того, если позднее внесено какое-то изменение в одно из положений границ, то придется повторить весь процесс моделирования заново. Для преодоления этой проблемы создаются отдельные модели различных структур. Например, можно построить две разные модели для дайки и массива пород, в который она внедрена. Итоговая модель строится путем наложения дайки на основную породу. Если позднее необходимо переопределить позицию дайки, то создается новая модель дайки и добавляется снова поверх оригинальной модели массива пород. Пример пересечения даек представлен на Рис. 2.11.

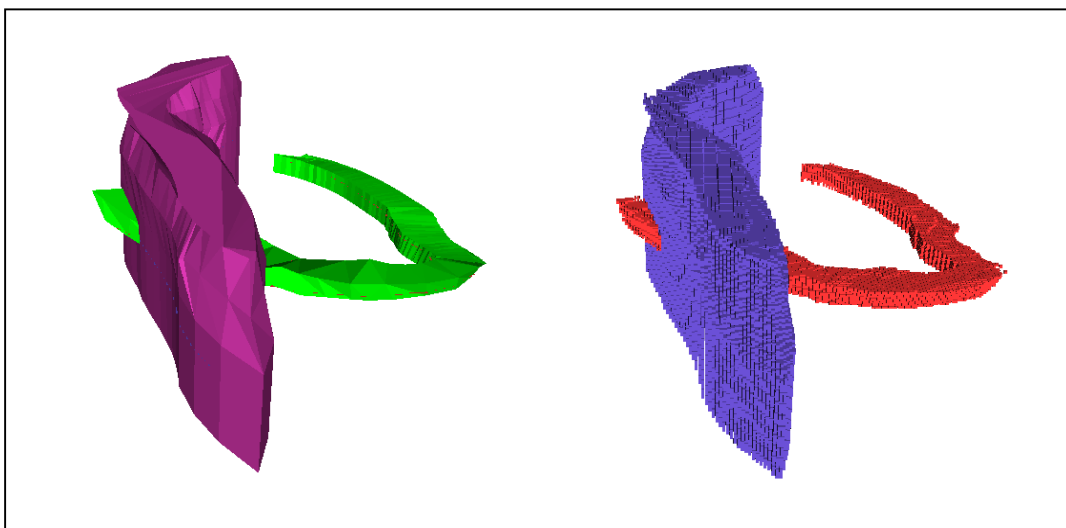


Рис. 2.11. Каркасная и блочная модели пересечения двух даек

ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Выбор методики встраивания топографической поверхности в модель зависит в первую очередь от типа и количества доступных данных.

Ровная местность

Когда единственной информацией являются данные об устьях скважин, а земная поверхность преимущественно плоская или слегка всхолмленная, то можно использовать процедуру интерполяции поверхности. Если на краях модели данные отсутствуют, то, применяя математическую процедуру тренд анализа, можно вычислить приближенное уравнение поверхности и использовать его в дальнейшем при интерполяции.

Холмистая поверхность

Если топографическая поверхность неровная, то при интерполяции она сглаживается. Это более заметно при малом количестве точек данных или когда они разбросаны по площади. Если сглаживание недопустимо, то альтернативой служит описание поверхности некоторым каркасом, то есть ***цифровой моделью рельефа*** которая создается из контурных линий, точечных данных, замкнутых периметров объектов или любой комбинации этих трех типов данных. Другое преимущество использования каркаса поверхности состоит в том, что возможно получить его разрез по любому направлению и вывести результат на плоттер.

После построения цифровой модели рельефа, она заполняется ячейками ниже поверхности. Этим ячейкам присваивается уникальный атрибутивный код, идентифицирующий ту или иную горную породу. Это позволит отличать ячейки топографии от геологических объектов. Можно использовать простой критерий для того, чтобы потом легко извлекать блоки ниже топографической поверхности.

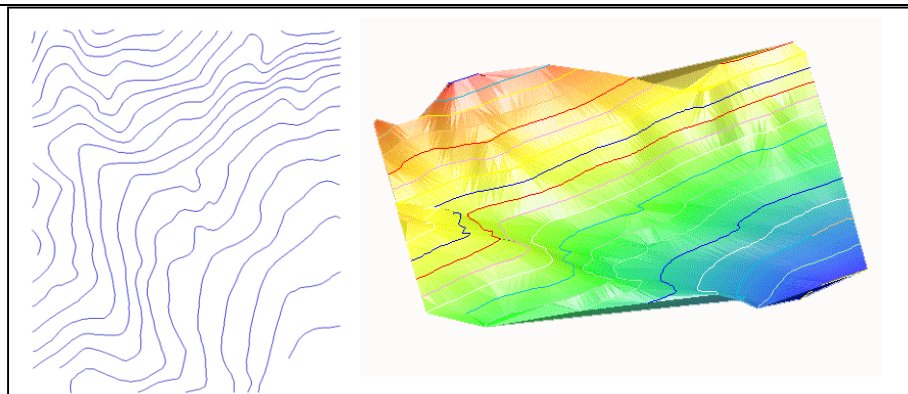


Рис. 2.12. Топографическая поверхность в виде изолиний (слева) и каркасной модели (справа)

ПЛАСТЫ

Моделирование пластов аналогично моделированию топографической поверхности. Основное отличие состоит в том, что теперь необходимо рассматривать две или более поверхности. Как и в случае с топографической поверхностью данная методика построения пластовой модели в первую очередь зависит от природы исходных геологических данных и сложности пластов. Три способа и условия их применения следующие:

Интерполяция - использование точек данных по контактам пород в скважинах. Потеря данных на границах модели Простые поверхности (плоское залегание, без сложных складок и надвигов)

Каркасное моделирование (Триангуляция поверхности с последующим заполнением каркаса блоками) - Использование точек данных и/или контуров по контактам пород в скважинах. Информация распространяется на всю модель Простые поверхности (без сложных складок и надвигов)

Каркасное моделирование (Связывание контуров, заполнение поверхности треугольниками и последующее заполнение каркаса блоками) - Контурные данные (интерполяционные сечения). Информация распространяется на всю модель. Сложные поверхности (любые ориентации и надвиги)

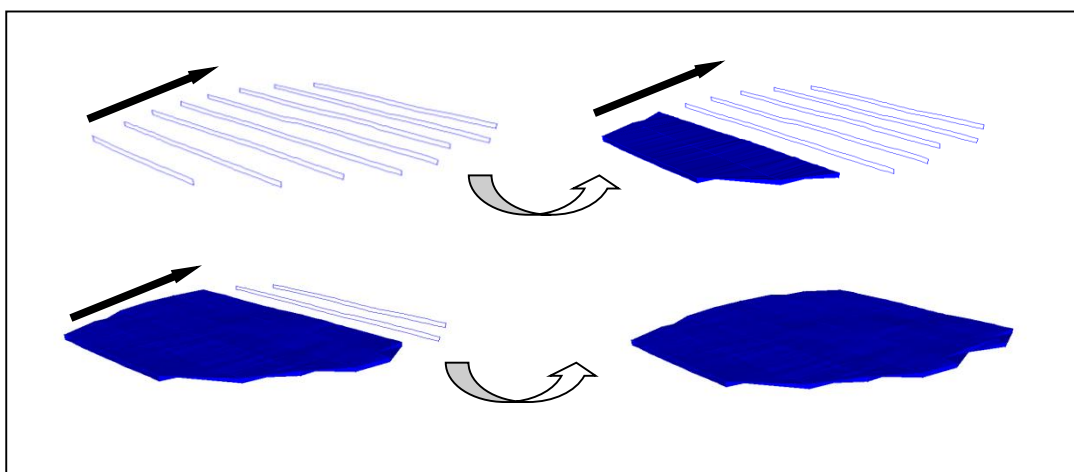


Рис. 2.13. Пример создания каркасной модели пласта по данным вертикальных сечений

Какая бы методика не использовалась, при наличии нескольких пластов каждый должен моделироваться отдельно с присвоением ему необходимых атрибутов и содержания полезного компонента. Затем последовательно добавляются отдельные

модели с помощью процедуры объединения моделей для формирования итоговой модели.

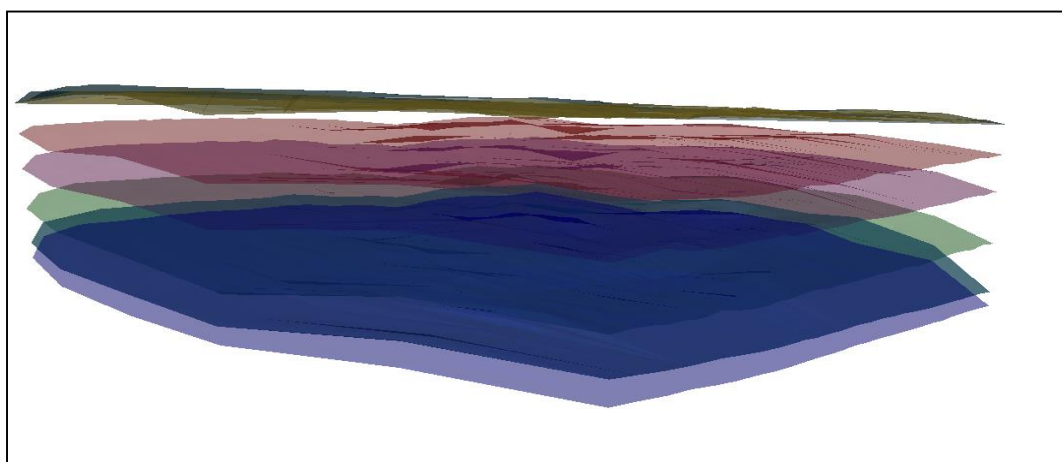


Рис. 2.14. Каркасные модели кровли и подошвы серии пластов

МАССИВНЫЕ ЗАЛЕЖИ

Массивные залежи могут не иметь внешних границ минерализации в пределах интересующей области моделирования. В таких случаях эта модель может рассматриваться как неограниченная. Можно создать для нее блочную модель, применяя последовательно процедуры генерации решетки с последующей интерполяцией исходных данных опробования в узлы решетки. Установочные параметры интерполяции определяют координаты центров и условия расчета значений в ячейках для области моделирования. Применяются два подхода к построению неограниченной модели на основе интерполяционного процесса:

- Создание решетки или прототипа модели для всего объема модели. Использование полученной решетки в качестве прототипа в процедуре интерполяции и присвоения содержания компонента центрам ячеек (блоков). Ячейки, не удовлетворяющие принятым ограничениям, отбрасываются без присвоения значений.
- Использование процесса интерполяции содержания для пустой решетки и расчет значений ячеек (блоков).

ИНТРУЗИВНЫЕ ТЕЛА

Обычно интрузивные тела имеют четкие границы, внутри которых выполняется интерполяцию по скважинным данным. Первый шаг должен заключаться в оцифровке набора контуров на сечениях. Если эти контуры плоские и лежат в плоскостях 'XY', 'XZ' или 'YZ', то используется процедура заполнения их ячейками. В качестве альтернативы можно создать каркас из периметров сечений тела и затем заполнить этот каркас блоками. Полигоны, которые не являются плоскими и не лежат в одной плоскости, необходимо использовать для построения каркаса.

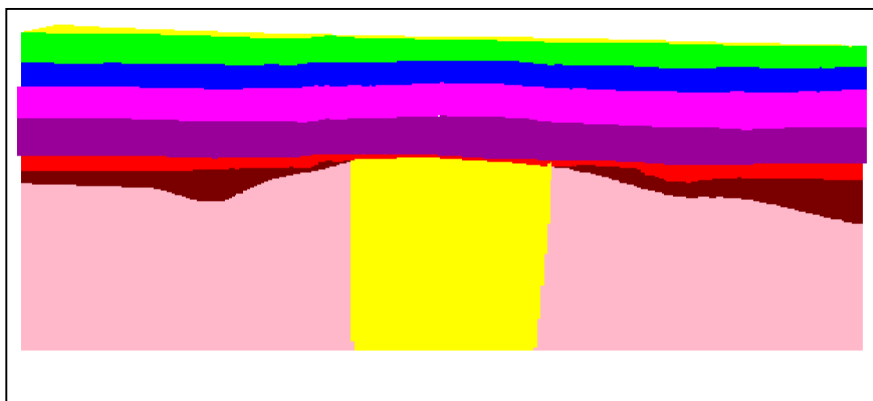


Рис. 2.15. Пример создания геологической модели, состоящей из перекрывающих и вмещающих пород, а также рудного тела

СКЛАДКИ

Складчатые поверхности лучше всего могут быть представлены с использованием каркасных моделей. Поскольку это еще один случай моделирования поверхности, то используемая для создания подобных каркасов методика аналогична таковой, применяемой при создании топографических каркасных моделей.

Если создать каркас складчатой поверхности довольно легко, то для включения его в геологическую блочную модель требуется более сложная процедура. Вместо заполнения объема ячейками теперь необходимо создать ячейки по одну сторону каркаса. В качестве направлений заполнения выбирается одно из направлений: восток, запад, север или юг. Ячейкам дается уникальный код зоны для их возможной последующей идентификации.

Возможно использовать каркасную модель складки для отображения ее на геологических разрезах. Таким образом, показать точное трехмерное положение складок и использовать их при геологической интерпретации. Эти срезы каркасной модели можно также использовать для получения узловых точек при оцифровке интерпретируемых периметров.

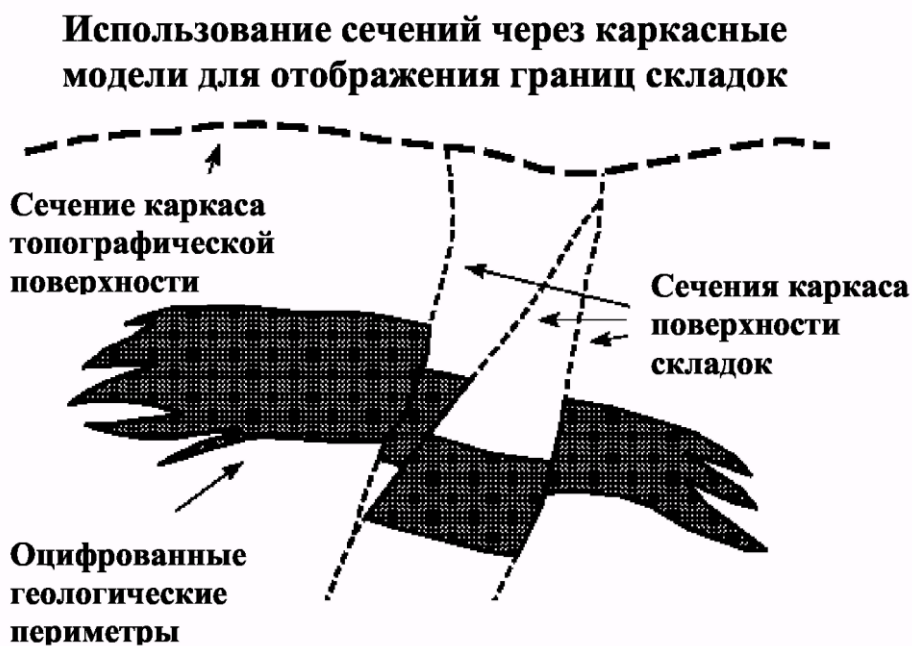


Рис. 2.16. Отображение границ складок в сечении

ОБЪЕДИНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

Способность объединять модели является мощным средством геологического моделирования. Помимо предоставления возможности создания сложных моделей посредством простых шагов, эта процедура дает возможность также в дальнейшем обновлять и дорабатывать существующие модели, поэтому важно понимать механизм объединения моделей, как он реализован в программе.

Требования к моделям

Для объединения двух моделей они должны иметь одинаковые параметрические описания (то есть общую точку привязки, одинаковый размер и число родительских ячеек). Если две модели, которые надо объединить, не имеют равных параметрических описаний, то необходимо изменить параметры одной из моделей. При добавлении моделей лучше всего использовать первую модель как прототип для реструктурирования второй модели.

Атрибутивные поля

Любые поля атрибутов, таких как литология или качество, обрабатываются согласно следующим правилам:

- Если поля уникальны для каждой входной модели, то все эти поля записываются в выходную модель. Поля, которым не присваиваются значения из входных моделей, считаются неопределенными (-).
- Если в двух входных моделях существуют одинаковые поля, то поля во второй модели переписывают поля в первой модели.

Объединение ячеек

При объединении моделей ячейки вначале сравниваются для установления перекрытия. Если ячейки не перекрываются или перекрываются с точностью до совпадения границ, то расщепления не происходит, и обновляются лишь атрибуты ячеек. Если ячейки частично

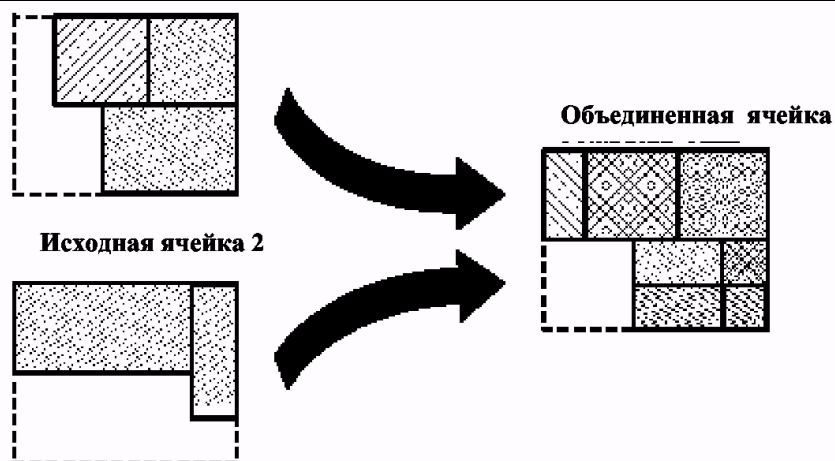


Рис. 2.17. Объединение блоков или ячеек

перекрываются, то они расщепляются вдоль каждой из границ ячейки до обновления атрибутивных полей. Поскольку результирующая ячейка должна быть прямоугольной, то расщепление будет продолжаться до полной длины ячейки.

Переблокировка модели

В большинстве случаев при объединении моделей новая результирующая модель содержит больше блоков, чем их число во входных моделях. Если новая модель становится слишком большой для хранения на диске компьютера, то можно объединить ячейки в более крупные. Для этого применяется процедура переблокировки модели, однако при этом происходит усреднение показателей и часть информации может быть потеряна.

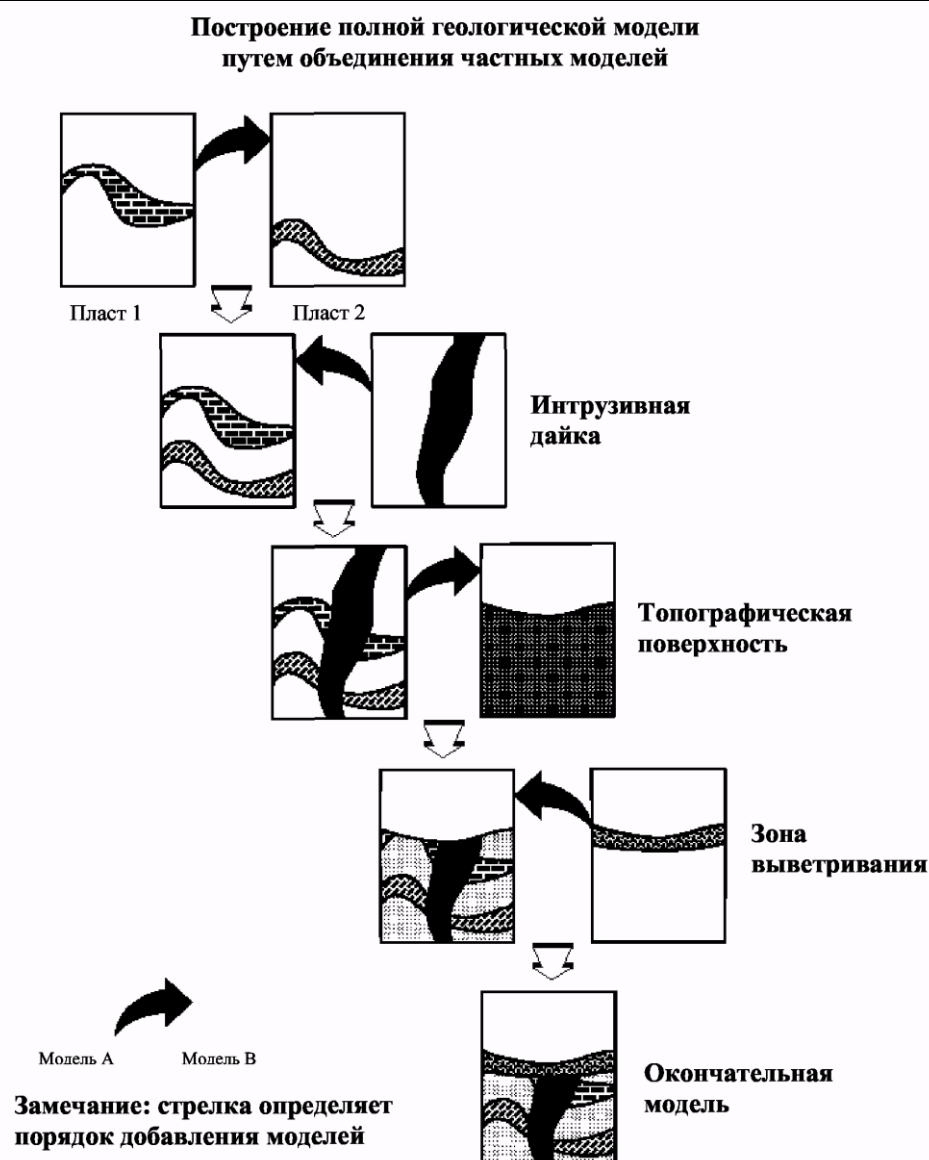


Рис. 2.18. Построение комплексной геологической блочной модели

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ

Интерполяция содержания - это процесс оценки значений в точках (например, в ячейках блочной модели) на основе некоторого ряда данных трехмерного опробования. Эта информация обычно берется из скважин, образцов с поверхности или бороздовых проб в подземных горных выработках.

Существует несколько математических методов интерполяции, один из которых может быть более пригоден, чем остальные. Первым делом при интерполяции содержания необходимо проанализировать исходные данные. То есть, необходимо знать каким образом содержание зависит от расстояния и направления. Самым надежным способом является вычисление и построение графиков вариограмм. Необходимо построить вариограммы для серии расстояний и направлений. После этого следует использовать процедуру отображения графиков вариограмм и подгонку к данным

приемлемой математической модели. Этот процесс производится с применением геостатистических исследований.



Рис. 2.19. Экспериментальная вариограмма и её аппроксимация сферической моделью

2.2 ОПРОБОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

2.2.1 УЧЁТ УРАГАННЫХ ПРОБ

Понятие об «ураганных» пробах возникло при разведке и оценке месторождений золота, где содержание металла крайне неравномерно и часто возникает проблема учета самородков для определения среднего содержания металла по выработке, блоку и залежи. Впоследствии вопрос правильной оценки резко выдающихся значений был исследован в связи с широким развитием разведки буровыми скважинами крупновкрапленных руд олова, вольфрама, слюды, ртути и др. В итоге были установлены основные статистические критерии отбора проб и правила обработки ураганных значений [80].

Пробы с необычайно высокими и низкими содержаниями указывают на крайне неравномерное распределение ценного компонента, и запасы в таких блоках должны оцениваться по более низкой категории как недостаточно разведанные с точки зрения его распределения. Поэтому в первую очередь необходимо тщательно проверять пробы на наличие дубликатов и выявлять ошибки определения содержаний.

Согласно принятым решениям ГКЗ к «ураганным» предлагается относить такие пробы, контроль которых по каким-либо причинам невозможен, а учет при оценке приводит к завышению запасов более чем на 10%. В связи с этим важно оценить и смоделировать пространственное распределение компонента внутри залежи, чтобы выделить в ней соответствующие участки и ограничить область влияния ураганных проб на конечные результаты.

Наиболее простой способ учёта ураганных проб и некорректных записей в базе данных состоит в визуальном просмотре полей таблиц и гистограмм опробования. Записи со значениями ниже и выше определенного порога исключаются или заменяются предельно допустимыми значениями. В одних случаях выдающееся содержание заменяют ближайшим по величине, в других — средним с учетом «ураганного», в третьих — средним без учета «ураганного» содержания, в четвертых — удвоенным средним и т. д. Если в массиве проб не выявлено наличие эффекта самородков, то наиболее целесообразным представляется замена «ураганного» значения ближайшим по величине содержанием, признанным не ураганным.

Одним из распространённых способов обнаружения ураганных проб является способ классификации значений, который реализуется в компьютерных программах следующим образом.

- Диапазон содержаний ценного компонента делится на 10 классов. Пробы сортируются по величине содержания ценного компонента и в каждом классе подсчитывается число проб и доля компонента от общего числа.
- Если последний класс, 90-100%, содержит более 40% проб, то его вновь разбивают на 10 классов содержаний для выявления ураганных записей.
- Границей ураганных проб считается минимальное содержание первого класса, в котором содержится более 10% ценного компонента.

Описанный анализ рекомендуется проводить отдельно для каждого рудного тела, типа руды или залежи. В практике известны случаи, когда граница ураганного класса резко отличалась для разных участков месторождения.

Ещё один способ учёта ураганных проб состоит в том, что строится кумулятивное распределение массива точек данных опробования и исследуется его хвостовая часть, близкая к 100%. Граница начала ураганных проб определяется по точке излома графика упорядоченных по возрастанию значений. После этого принимается решение об исключении хвостовой части кумулятивного распределения по достижении им значения 95 или 99%. Следует, однако, отметить, что вопрос о необходимости отбрасывания ураганных значений остается открытым. Существует точка зрения, приведенная в монографии, что правильно выполненный кринг способен устранить отрицательное

влияние небольшого количества ураганных проб, если их доля составляет порядка нескольких процентов.

В целом унифицированные алгоритмы компьютерной обработки «ураганных» проб позволяют оценить как надежность принятых решений, так и повысить достоверность подсчета геолого-промышленных запасов.

2.2.2 ДЕКЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ

Разведочные выработки и точки опробования обычно размещаются на площади месторождения достаточно неравномерно. Сеть скважин эксплуатационной геологической разведки, как правило, сгущается на наиболее перспективных участках месторождения с целью повышения достоверности оценки запасов и обеспечения надежного планирования добычи. Если подобный суммарный массив данных непосредственно использовать при интерполяции содержаний и построения блочной модели, то влияние более плотно покрытых точками участков будет существенно преобладать по сравнению со слабо разведанными периферийными областями месторождения.

Для уменьшения негативного влияния неоднородной густоты сети опробования на интерполяцию используется процедура декластеризации. Она осуществляет обработку первичных данных непосредственно перед использованием их в процедурах интерполяции. При этом сами первичные данные сохраняются в исходной таблице в неизменном виде. В процедуре декластеризации предлагаются следующие варианты отбора проб в ячейках регулярных решетках типа GRID 2D или GRID 3D:

- случайный выбор точки опробования среди всех попавших в ячейку (каждый раз новый выбор номера точки);
- псевдослучайный выбор точки опробования внутри ячейки (номер точки повторяется)
- выбирается ближайшая к центру ячейки точка опробования;
- используется среднее значение всех точек опробования в ячейке

Декластеризация позволяет повысить точность и быстроту работы таких методов интерполяции как кригинг, обратные расстояния и полиномиальная регрессия. Вместе с тем необходимо отметить, что при интерполяции по методу ближайшей точки, при линейной интерполяции по сети треугольников и по методу соседних регионов Вороного в декластеризации нет необходимости, поскольку алгоритмы перечисленных методов уже включают в той или иной степени операции декластеризации или сглаживания.

2.2.3 ИНКЛИНОМЕТРИЯ СКВАЖИН

Для расчета траектории ствола скважины и координат проб по данным инклинометрии в базе данных первичной информации должны присутствовать как минимум следующие таблицы:

- таблица данных о скважинах Collars с именами скважин (например, скважина 103b) и координатами устьев скважин (XYZ);
- таблица данных результатов инклинометрии скважин Inclins (глубина замера, зенитный и азимутальный углы);
- таблица данных опробования Assays для интервалов отбора проб (от и до) и с результатами анализа проб по контролируемым компонентам (химический и минералогический состав проб, плотность и т.д.).

В общем случае расчет траектории стволов скважин осуществляется по данным инклинометрии методом усреднения углов, когда зенитный угол (отклонение скважины от вертикали, θ) и азимут (α) на протяжении участка интерполяции принимается равными средним арифметическим соответствующих углов, замеренных на концах

интервалов. Приращения координат dX , dY , dZ для двух точек замера вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}dX &= dL * \sin((\theta_1 + \theta_2)/2) * \sin((\alpha_1 + \alpha_2)/2), \\dY &= dL * \sin((\theta_1 + \theta_2)/2) * \cos((\alpha_1 + \alpha_2)/2), \\dZ &= dL * \cos((\theta_1 + \theta_2)/2),\end{aligned}\tag{2.1}$$

где dL - длина интервала

Метод отличается приемлемой точностью для скважин глубиной до 2000 м. Для более глубоких скважин используются более точные формулы.

2.2.4 СОСТАВЛЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ И ГРУППОВЫХ ПРОБ

Для моделирования вариограмм и интерполяции необходимо иметь пробы одинаковой длины. Составные пробы чаще всего рассчитывают вдоль траектории скважины или разведочного пересечения. Искусственные интервалы обычно не совпадают с интервалами опробования, поэтому пересчитанные значения вещественных атрибутов (содержания компонентов, плотность, масса, влажность и прочие характеристики) должны определяться в виде средневзвешенной оценки исходных проб, входящих в составной интервал. В ряде случаев могут использоваться и другие методы пересчёта вещественных атрибутов, такие как присвоение среднеарифметических, максимальных или минимальных значений. Для не вещественных атрибутов (индекс породы, текст, логическая переменная и так далее) можно использовать один из методов присвоения: по пробе центра интервала, по пробе с максимальным размером в композите, по пробе с максимальным значением в композите.

Как правило, длина композитных проб выбирается равной средней длине опробования на месторождении и составляет величину в пределах одного или двух метров. Для определения неравномерности длины опробования можно построить гистограмму распределения и определить наиболее оптимальную длину композитных интервалов.

Если на месторождении несколько ценных компонентов и каждый был интерпретирован отдельно, то компоновку для каждого компонента целесообразно проводить отдельно.

1. Расчёт композитных интервалов по уступам. Метод применяется, когда пользователь хочет рассчитать средние содержания для каждой скважины, разбив интервалы по абсолютным превышениям, например, по уступам проектного карьера.
2. Расчёт композитных интервалов по содержаниям. Этот метод полезен, если необходимо оценить мощности рудных пересечений при заданных средних содержаниях полезного компонента на выходе. При этом можно включить безрудные прослои в рудные интервалы, а также учесть включение безрудного материала выше или ниже рудных пересечений. Это может быть полезным в случаях, когда рудное пересечение слишком маломощное и следует добавить к нему безрудные интервалы и пересчитать среднее содержание полученного композита. Метод может применяться на месторождениях с сильно неравномерным распределением полезного элемента и нечеткими геологическими границами рудных тел.
3. Расчёт композитных интервалов по геологии. В этом случае композитные интервалы будут созданы для каждой скважины в пределах каждого литологического или геологического кода. Операция объединяет пробы в композитные интервалы вдоль скважины до тех пор, пока не встретит другой геологический код, после чего будет начат следующий композит. Метод используется для расчёта средних содержаний в пределах разных геологических тел или пластов.
4. Расчёт композитных проб по интервалам. Метод применяется для объединения различных файлов скважин с интервалами различной длины. Для этого обычно используется файл документации геологии и файл опробования. Метод соединяет эти файлы в один, пересчитывая при необходимости интервалы опробования. При

этом пересчета содержаний не происходит, так как вновь созданные интервалы основаны на исходных файлах, а не на заданной длине композитного интервала.

Объединение проб можно выполнять не для всей базы данных, а лишь в пределах отдельных пластов или минерализации. Для этого в таблице интервального опробования необходимо указать поле индекса, которое будет служить в качестве индикатора выполнения или не выполнения компоновки. Например, те записи, которые помечены флажком индикатора 0 не будут включаться в композитные пробы.

2.3 ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

В 60-х годах нашего столетия а мире появилась и начала быстро развиваться новая теория оценки пространственных переменных – геостатистика [66, 101]. Геостатистика - это набор статистических функций, которые используются для изучения пространственного распределения различных геологических величин и решения практических задач прикладной геологии. Эти функции описывают, прежде всего, корреляцию содержаний в пространстве. Метод основан на математике моделирования случайных процессов со стационарными приращениями, случайных процессов с независимыми приращениями заданного порядка. Теория близка к теории оптимальных фильтров Колмогорова-Винера и впервые была предложена D.G.Krige, который разработал эту методику в попытке более точно предсказать рудные запасы., получила развитие в работах Матерона, Журнеля, Армстронга, Дэвида и др. [103]. Геостатистика представляет собой статистические методы описания пространственных отношений среди типовых данных и применение в дальнейшем этот анализ к предсказанию пространственных распределений при оценке месторождения и выявления структурных особенностей исследуемого признака. Детерминированные подходы в оценке месторождения (метод обратных расстояний, интерполяция, сглаживание) основаны на априорных математических моделях пространственного изменения. Предполагается, что результаты опробования не имеют никаких ошибок, что является недостаточно верным предположением. Практически, ошибка не может быть устранена, она может быть только минимизирована. Таким образом, в большинстве случаев перечисленные методы не могут производить более представительную оценку исследуемой области.

Особенно мощный толчок теория получила с развитием компьютерных технологий, без которых невозможна обычная в геостатистике обработка громадных массивов исходной геологической информации. Применение геостатистики в геологической области основано на возможности получать несмещенные оценки и минимальную погрешность расчетов. Геостатистика располагает надежными инструментами для оптимизации параметров опробования и оценки месторождения в целом либо выделенного геологического блока. Используя методы геостатистики, возможно решать на одной базовой исходной геологической информации многие геолого-оценочные, проектные и плановые задачи, возникающие на всех стадиях разведки и разработки месторождения полезных ископаемых. Тем не менее, необходимое условие для применения геостатистики - наличие достаточно надежной корреляционной связи между пробами в пространстве и отсутствие в исследуемой области резких изменений свойств исследуемого признака. Одним из начальных этапов применения геостатистических исследований - пространственный корреляционный анализ, т.е. исследование характера корреляционных связей между пробами в различных направлениях, результатом подобных исследований являются экспериментальные функции (вариограммы). Очень важным этапом при геостатистическом исследовании, является построение вариограмм и их анализ.

В идеальном случае все исследуемое количество проб принадлежит одному сравнительно однородному участку массива и представляет собой результат одного этапа исследования месторождения, проведенного по одной методике. На самом деле такие случаи довольно редки. Чаще всего приходится иметь дело с неоднородными массивами данных, содержащих к тому же экстремальные значения проб, что может привести в дальнейшей работе к ошибочным результатам. Поэтому предварительной стадией геостатистического исследования является первичный анализ и, при необходимости, преобразование исходной информации.

Самый распространенный тип распределения случайной величины, для которого существуют наиболее простые методы расчета – нормальное (или гауссово) распределение. В большинстве случаев реальное распределение сильно отличается от нормального (к примеру, присутствие в массиве данных большого числа маленьких значений и всего несколько больших). В этом случае к гистограмме может быть подобран другой закон распределения, например - логнормальный.

Вид гистограммы, который зависит от заданного пользователем числа классов, позволяет обнаружить явные погрешности в исходных данных геологического опробования. При выявлении таких значений необходимо их откорректировать.

Таким образом, первичный анализ геологических данных включает расчет гистограммы распределения содержаний полезных компонентов по классам, построение графика накопленных частот, подбор закона распределения данных и нахождение основных статистических параметров (математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения).

Наличие определенного закона распределения дает возможность корректно применять геостатистические расчеты и исследования, для создания, в конечном счете, наиболее достоверной модели кимберлитового месторождения. Эмпирическое распределение алмазов зависит как от представительности опробования, так и от формы его выражения (в весовых или количественных измерениях). Поскольку нас интересует, в конечном результате, создание моделей по содержанию алмазов, в расчетах используются весовые выражения. Для определения закона распределения изучаемого признака, рассчитываются эмпирические и теоретические частоты содержания алмазов. Теоретические и эмпирические кривые рассчитываются также по общему содержанию и по каждому гранулометрическому классу. Объективную оценку близости эмпирических частот к теоретическим можно определить с помощью критерия согласия Пирсона [20]. Для оценки близости эмпирического распределения к теоретическому определяется вероятность достижения критерия согласия данной величины $P(\chi^2)$ при случайных отклонениях частот. Если вероятность $P(\chi^2)$ значительно отличается от нуля (оказывается больше чем 0.05), то отклонения фактических частот от теоретических можно считать случайными. Если же $P(\chi^2) < 0.05$, то эмпирическое распределение является принципиально отличным от теоретического. Поэтому все статистические исследования при исследовании распределения содержаний алмазов проводились при уровне значимости $\alpha=0.05$.

Для надежности определения закона распределения исследуемого признака дополнительно применялся критерий согласия Колмогорова, равный максимальной абсолютной величине разности накопленных частот в сравниваемых распределениях, разделенной на квадратный корень из числа наблюдений.

По рассчитанному критерию согласия Колмогорова определялась табличная величина доверительной вероятности, т.е. вероятности, которую можно признать достаточной для суждения о достоверности характеристик, полученных на основе выборочных наблюдений. Доверительная вероятность дает возможность установить доверительные границы случайного колебания изучаемого явления. В качестве доверительной границы принимают $P(\chi^2)=0.95$ или $P(\chi^2)=0.99$.

Необходимо отметить, что исследования исходных параметров на соответствие определенного закона распределения необходимы только на начальном этапе создания геолого-математических моделей. Тем не менее, близость закона распределения к нормальному не гарантирует эффективность применения метода оценки. Это в первую очередь зависит от представительности выборки. При пополнении базы данных исследуемого параметра, не исключено переход от нормального закона к логнормальному и наоборот. В дальнейшем проверка на определение закона распределения изучаемого признака возможна по гистограммам или кумулятивным графикам, построение которых не представляет особых сложностей.

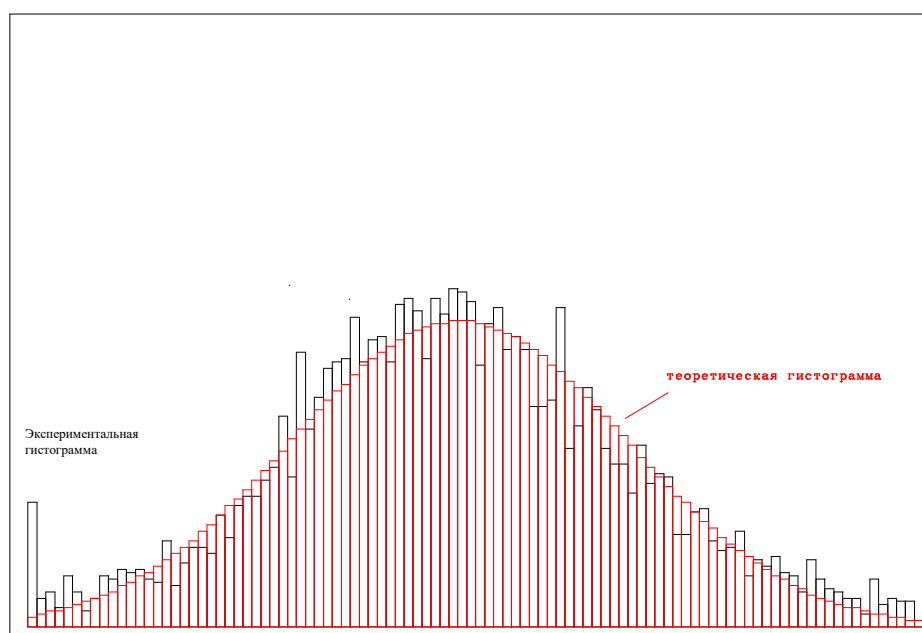


Рис. 2.20. Пример гистограмм эмпирических и теоретических частот.

В некоторых случаях реальные распределения алмазов сильно отличаются от нормального закона, что связано с наличием в массиве большого количества низких значений и всего несколько высоких. Примером тому могут служить россыпные месторождения. В этом случае к реальной гистограмме может быть подобран логнормальный закон распределения, при котором распределение логарифмов значений является нормальным.

Подобные предварительные геостатистические исследования на примере кимберлитового месторождения подтверждают либо подвергают сомнению достоверность исходной геологической информации. При построении геолого-математической модели необходимо учитывать качество исходных данных и, соответственно, учитывать это качество при определении надежности выполненных расчетов.

При анализе пространственных явлений очень часто затруднительно или вовсе невозможно получить истинный закон распределения данных на основе процессов, обуславливающих эти явления. Альтернативным подходом является статистическое описание пространственного распределения. В отличие от детерминированных методов, геостатистические оценки опираются на информацию о внутренней структуре данных, зависят от самих данных, т.е. являются адаптивными.

Под структурой месторождения в геостатистическом анализе подразумевается как пространственное распределение самих содержаний, так и их коррелятивность в зависимости от направления и расстояния между точками опробования. Для нахождения корреляционной зависимости используется вариограммный анализ,

который проводится на нормализованных пробах, приведенных к определенной длине. В этом случае моделью пробы является точка в 3-мерном моделируемом пространстве. В практической деятельности используют экспериментальные вариограммы, которые строятся по результатам опробования и в которых учитывают все пары проб, удаленных друг от друга на некоторое расстояние.

Геостатистика базируется на статистической интерпретации данных. Предполагается, что данные измерений $v(x)$ являются реализациями случайных переменных $V(x)$, которые описываются некоторыми функциями распределения. Это, тем не менее, не означает, что природа самого процесса является случайной. При использовании геостатистики, необходимо определить пространственную корреляционную структуру поля $V(x)$, задаваемую всеми случайными переменными в области исследования.

Пространственная непрерывность существует в большинстве геологических явлений и выражает простое свойство данных: значения исследуемой функции $V(x)$ в двух точках, находящихся ближе друг к другу, скорее будут иметь близкие значения, чем соответствующие значения в более удаленных друг от друга точках.

Для количественного анализа пространственной непрерывности данных часто используют диаграммы взаимного разброса пар. На плоскости отмечают все возможные пары измерений находящихся на определенном расстоянии h друг от друга в пространстве переменных X . Диаграмма характеризует коррелированность данных на некотором расстоянии и в определенном направлении. Если значения в паре, разделенной вектором $h = x_i - x_j$, обозначить $V(x)$ и $V(x+h)$, то по осям диаграммы будут отложены эти же величины $y = V(x) = V(x+h)$. Если значения в точках, разделенных вектором (либо расстоянием) h близки, то точки диаграммы сгруппируются вдоль прямой $y = x$. При большей разнице между значениями в парах облако на диаграмме будет расплываться. Это обычно происходит при увеличении расстояния h . Часто на итоговую статистику диаграммы влияют отдельные отклонения. Такие пары точек лежат в отдалении от прямой $y = x$. В этом случае рекомендуется проводить расчеты с исключением этих точек [44, 62].

Для проведения пространственного корреляционного анализа используются следующие моменты второго порядка, обеспечивающие различные описания пространственной непрерывности:

1. Ковариация - статистическая мера корреляции между двумя значениями $V(x)$ и $V(x+h)$ в точках, находящихся на расстоянии h .

$$C(h) = E[(V(x) - m(x))(V(x+h) - m(x+h))] \quad (2.2)$$

Для $N(h)$ экспериментальных точек находящихся на расстоянии h друг от друга:

$$C(x) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} V(x_i) \cdot V(x_i + h) - m_{-h} m_{+h} \quad (2.3)$$

где: m_{-h} - среднее значение для данных, находящихся в началах вектора h :

$$m_{-h}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} V(x_i) \quad (2.4)$$

m_{+h} - среднее значение для данных, находящихся в концах вектора h :

$$m_{+h}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} V(x_i + h) \quad (2.5)$$

$$m(h) = 0.5(m_{+h} + m_{-h})$$

Ковариацией можно пользоваться только в предположении о стационарности второго порядка.

2. Полувариограмма или просто вариограмма - вариация разницы значений переменной в двух точках как функция расстояния и направления между ними:

$$\gamma(x, x+h) = 0.5 \cdot \text{Var}[V(x) - V(x+h)] = 0.5E[(V(x) - V(x+h))^2] \quad (2.6)$$

Для $N(h)$ экспериментальных точек находящихся на расстоянии h друг от друга:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (V(x_i) - V(x_i+h))^2 \quad (2.7)$$

Вариограмма обладает свойством симметрии: $\gamma(h) = \gamma(-h)$ и характеризует степень различия данных в зависимости от расстояния между ними. Чем ближе значения данных (меньше разница между ними), тем выше значение вариограммы. Ковариация характеризует обратное – сходимость данных. Чем более похожи данные тем выше значение ковариации.

При выполнении условия стационарности второго порядка выполняется следующее соотношение между вариограммой и ковариацией:

$$\begin{aligned} \gamma(0) &= C(\infty) \\ \gamma(\infty) &= C(0) \\ \gamma(h) &= C(0) - C(h) \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $C(0)$ - априорная ковариация или экспериментальная вариация $\text{Var}[V(x)]$ в точке x .

3. Дрифт (drift) - очень важная функция при анализе:

$$D(h) = E[V(x) - V(x+h)] \quad (2.9)$$

Для экспериментальных данных он вычисляется по формуле:

$$D(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (V(x_i) - V(x_i+h)) \quad (2.10)$$

Дрифт может служить указателем подчинения данных внутренней гипотезе. Такой вывод можно сделать, если значение $D(h)$ колеблется вокруг 0. Если же $D(h)$ растет (или убывает) с ростом h , то данные не подчиняются даже внутренней гипотезе, не говоря уже о более строгом условии стационарности второго порядка [99]. Это может, в частности, означать, что у данных имеется систематический тренд, то есть определенная зависимость значения исследуемой функции от пространственного местоположения (координаты). Для таких данных моделирование вариограммы и использование обычных геостатистических оценщиков приведет к необоснованным результатам. Анализ поверхности тренда - это математический процесс для разделения базы данных проб на региональные и локальные компоненты. Тренд или девиация набора проб в базе данных означает медленное, крупно-масштабное направленное изменение значений содержаний в пределах изучаемого района. Такая база данных должна быть изменена перед тем, как такие данные могут быть смоделированы, используя стандартные геостатистические методы.

Целью расчёта поверхности тренда является определение и удаление тренда из базы данных. Это должно быть сделано по двум причинам:

- Модели вариограмм обоснованы только в том случае, если они созданы на основе базы данных, не имеющей тренда.
- Для того, чтобы использовать процесс трёхмерного кригинга, должны быть заданы параметры вариограмм остаточной вариации, также как и тип ожидаемого тренда.

Пример вариограммы, ковариации и тренда для геологического блока кимберлитового месторождения трубки «Удачная» показан на Рис. 2.21.

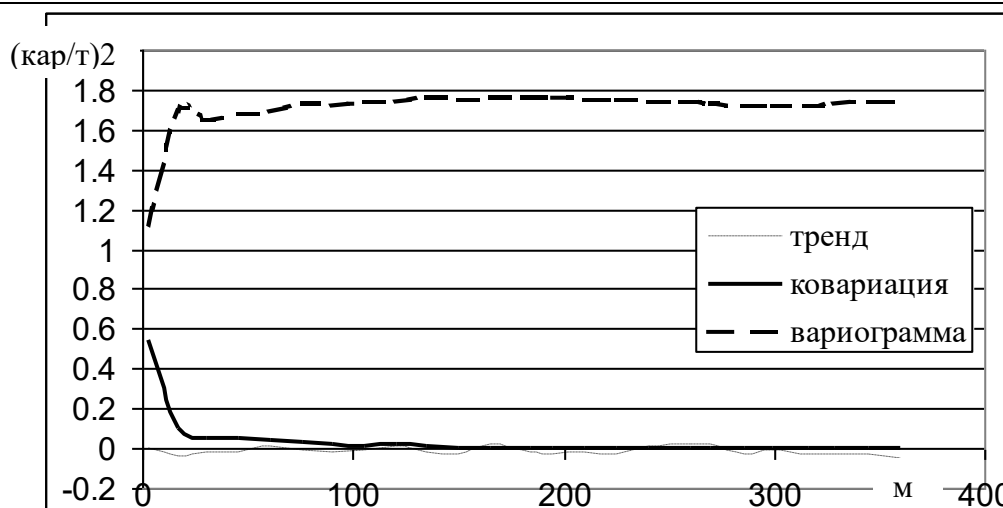


Рис. 2.21. Экспериментальная вариограмма, ковариация и тренд геологического блока трубки «Удачная»

2.3.1 КОВАРИАЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ И ВАРИОГРАММЫ

Для каждого интервала расстояний между пробами в каждом направлении отстраивается диаграмма рассеяния или «облако» соответствующих точек. Задача заключается в обобщении громадного множества данных; для чего можно вновь использовать коэффициент корреляции. Чем шире «облако», тем меньше коэффициент. Таким образом, в общем случае с увеличением расстояния h уменьшается величина этого коэффициента. В итоге мы получим корреляционную функцию или коррелограмму [99]. Эта функция обычно строится отдельно для всех исследуемых направлений. При умножении значений коррелограммы на дисперсию исследуемого массива, можно получить ковариационную функцию этого же направления. Существует еще один параметр для измерения разброса точек, это момент инерции, который увеличивается при возрастании h .

$$MI = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)$$

Момент инерции представляет собой половину среднеквадратичного расстояния между координатами x и y каждой точки на диаграмме рассеяния. Множитель $1/2$ позволяет измерить перпендикулярное расстояние каждой точки от линии $x = y$.

Функция зависимости момента инерции от величины расстояния между пробами $\gamma(h)$ является полувариограммой. Необходимо учитывать, что на конечный результат существенно влияют даже единичные значения, значение которых заметно отличаются от средней величины массива данных. Именно поэтому перед построением вариограммы очень важно проверить исходную информацию и по возможности откорректировать или исключить «ураганные» пробы. Сама же вариограмма рассчитывается по формуле (в векторном виде):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \left[\sum_{(ij)(h_{ij}+h)}^N (V_{i1} - V_{i2})^2 \right]$$

Применение аппарата геостатистики для решения различных практических горно-геологических задач подразумевает, прежде всего, построение вариограммной модели исследуемого объекта (месторождения в целом, геологического блока и т.п.), которая должна максимально соответствовать истинной структуре изменчивости объекта [93]. Создание вариограммной модели исследуемого объекта состоит из нескольких стадий:

- анализ, контроль и группировка исходной информации;

- построение экспериментальных вариограмм;
- исследование полученных функций на наличие эффектов;
- создание пространственной модели вариограммы.

При формировании групп исходной информации необходимо чтобы совместной обработке подвергались только пробы одной зоны, рудного тела, типа руды. Критерием такого подхода является существенное отличие типов и сортов руд разных зон, что может быть установлено с помощью анализа гистограмм и вариограмм. На Рис. 2.22 представлена вариограмма, имеющая три структуры, соответствующие различным типам кимберлитов. При смешивании качественно различных массивов данных, гистограммы также обычно имеют более одной вершины или значительное отклонение от нормального закона распределения. Пример подобного массива данных представлен на Рис. 2.23.

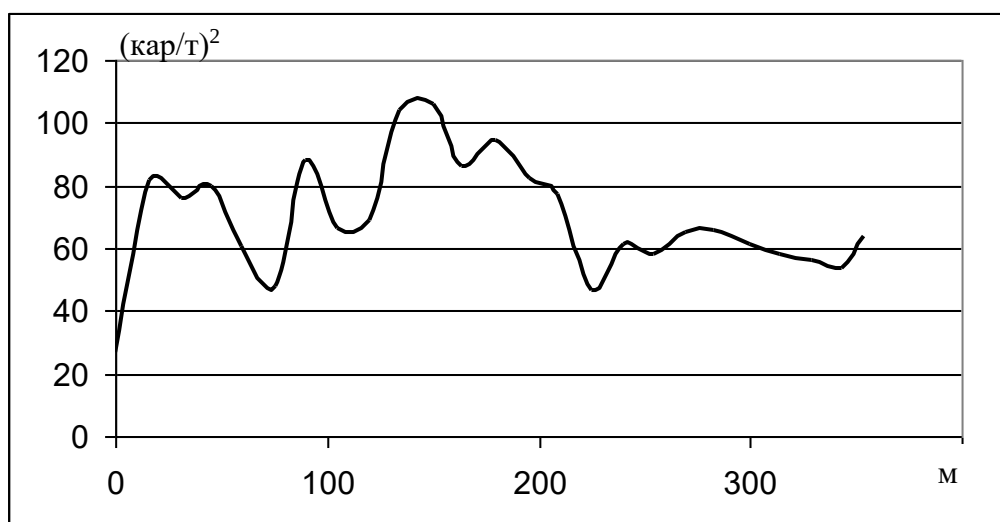


Рис. 2.22. Вариограмма общего содержания алмазов кимберлитовой трубки Ботубинская

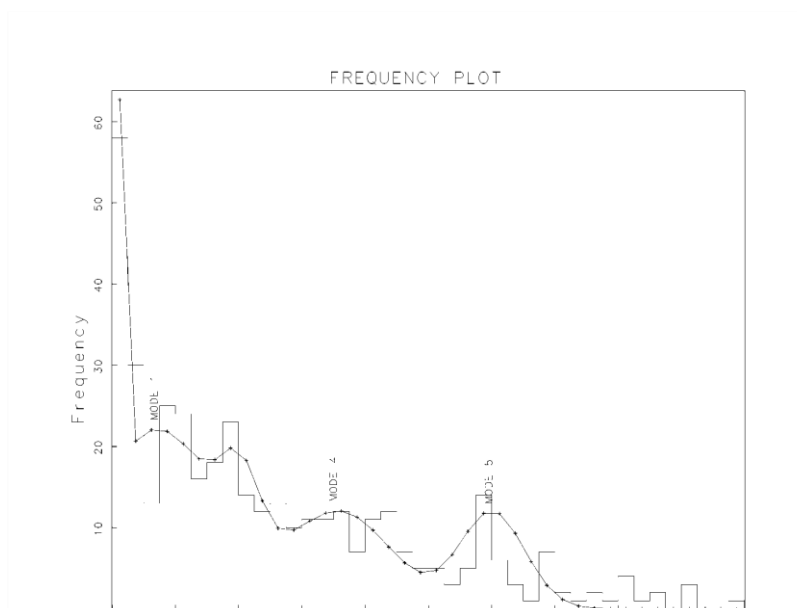


Рис. 2.23. Гистограмма общего содержания алмазов кимберлитовой трубки (по вертикальной оси – частота, по горизонтальной – содержание)

2.3.2 АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Изменчивость геологических показателей существенно влияет на методику геологической разведки, технологию компьютерного моделирования и выбор метода подсчета запасов. Процедуры количественной оценки изменчивости можно разделить на детерминированные или аналитические, вероятностные и геостатистические.

Использование компьютерных технологий привело к подавляющему распространению геостатистических методов анализа изменчивости наиболее устойчивых к нарушению исходных предпосылок, учитывающих пространственное размещение проб. Среди геостатистических методов основное распространение получили методы транзитивно-вероятностные (использующие теорию Марковских цепей) и с применением расчета вариограмм.

Применение вариограмм для анализа локальной или глобальной изменчивости геологических признаков на месторождении выполняется в два этапа: вначале рассчитывается экспериментальная вариограмма, а затем подбирается модель вариограммы, описывающая функционально пространственную закономерность изменчивости изучаемого показателя. Экспериментальная вариограмма находится вычислением дисперсии содержаний в каждой точке множества по отношению к каждой другой точке и отображается в виде графика зависимости дисперсии от расстояния между данными точками в заданном интервале величин - лаге. Модельная вариограмма обычно находится методом подбора кривой с заданным законом распределения к экспериментальной. Использование метода наименьших квадратов при подборе модельно-зависимых параметров при этом не всегда дает положительный результат. В большей степени при определении основных параметров вариограммы имеет опыт и знание месторождения и исследуемого признака.

2.3.3 АНИЗОТРОПИЯ.

Анизотропия пространственной переменной – значительное различие в скорости изменения признака (градиент) в разных направлениях. В изотропной среде скорость изменения изучаемого признака существенно не меняется. Относительно однородным по алмазонасности месторождениям (геологическим блокам) свойственна изотропная модель. Неоднородным, сложенным крупными, существенно разными по алмазонасности, разновидностями руд, присуща анизотропность, в направлении смены разновидностей кимберлитов. Наличие анизотропии проявляется на вариограммах их стабильным расхождением по определенным разным направлениям в плоскости или в вертикальном сечении. В некоторых случаях подобное расхождение может быть обусловлено недостаточным количеством пар исследуемых проб.

В основном, можно выделить два типа анизотропии – геометрическую и зональную. Первая связана в основном с геометрическим расположением рудного тела (вытянутость месторождения в каком-либо направлении), вторая – с распределением алмазов в пределах изучаемой области. Первоначальное определение наличия зональной анизотропии можно провести при изучении изолиний содержаний на различных горизонтах или построением модели распределения содержаний используя метод интерполяции.

Для выявления анизотропии используются модели вариограмм, построенные для всей плоскости через 10-20 или 30 градусов (в зависимости от степени детальности изучения месторождения, то есть от количества данных). По полученным данным строятся изолинии, в пределах наименьшей изменчивости изучаемого признака определяется направление анизотропии.

Таким образом, если существует зависимость вариограммы от ориентации пары точек в пространстве, то можно говорить о наличии анизотропии. Это означает существование структур данных с различными характеристиками в различных направлениях. В такой ситуации есть два выхода -построить одну модель изотропной

вариограммы и при ее использовании всякий раз производить с вектором h преобразования пространства и только после этого подставлять в качестве аргумента величину $|h|$. Второй выход состоит в полномасштабном моделировании анизотропной структуры вариограммы и использовании в вычислениях непосредственно ее. При этом, как правило, модель вариограммы имеет гнездовую структуру.

Различают анизотропию вариограмм следующих типов:

1. Геометрическая анизотропия.

В этом случае вариограммы (ковариации) по различным направлениям имеют одинаковую формы и плато, но разные радиусы. Тогда изолинии вариограммы на диаграмме имеют форму эллипсов. Это означает, что существует положительно определенная матрица B , такая что, $\gamma(h) = \gamma(h^T B h)$ - изотропная вариограмма. Преобразование пространства такое, что геометрически анизотропная вариограмма становится изотропной в преобразованном пространстве, определяют следующим образом:

$$h' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{a_{\min}}{a_{\max}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} h$$

где $a_{\max}$ - длина основной оси эллипса, $a_{\min}$ - длина малой оси эллипса, θ - угол, определяющий направление основной оси эллипса.

2. Зонная анизотропия - это анизотропия, которая не является геометрической. Например, это может быть случай, когда по различным направлениям различаются радиусы корреляции, но изолинии вариограммы не образуют эллипс, или когда для различных направлений различаются не только значения радиусов, но и значения плато. Из-за того, что существуют различные варианты зонной анизотропии, удобно провести дальнейшую их классификацию.

Случай зонной анизотропии, когда для различных направлений различаются только значения радиуса корреляции, называется *негеометрической анизотропией радиуса*. В этом случае для получения вариограммы, которую можно использовать для всех направлений, необходимо сделать следующее. Во-первых, нужно построить и запомнить функцию зависимости радиуса корреляции от угла $R(\varphi)$. Во-вторых, необходимо построить анизотропную модель вариограммы, взяв за основу одно из направлений. Например, это может быть направление θ , в котором радиус корреляции максимален и равен R_0 . Тогда при вычислении вариограммы достаточно воспользоваться преобразованием пространства:

$$h' = \begin{bmatrix} \frac{R_0}{R(\varphi)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} h$$

где φ - угол, определяющий направление, в котором достигается максимум значения модуля $|h|$.

Рассмотрим теперь случай зонной анизотропии, когда для различных направлений отличаются значения плато. Этот случай можно назвать анизотропией плато. Наличие плато у вариограммы означает, что процесс не только удовлетворяет внутренней гипотезе, но и обладает стационарностью второго порядка. Тогда, учитывая поведение вариограммы на больших расстояниях, для любого фиксированного h можно написать:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \gamma(ah) = C(0) - \lim_{a \rightarrow \infty} C(ah)$$

Очевидно, что такое равенство можно было бы написать, для любого направления, где у вариограммы обнаружено плато. А так как мы имеем различные значения плато для различных направлений, то существуют хотя бы два направления h_1 и h_2 такие, что

$$\lim_{a \rightarrow \infty} C(ah_1) \neq \lim_{a \rightarrow \infty} C(ah_2)$$

А это означает, что по крайней мере в одном направлении

$$\lim_{a \rightarrow \infty} C(ah) \neq 0$$

То есть, если плато меняется в зависимости от направления, значит существует хотя бы одно направление, на котором корреляция между значениями не пропадает ни при каких расстояниях. При обнаружении анизотропии плато можно сделать два предположения о характере процесса:

- 1) стационарность второго порядка присутствует, но корреляция между значениями не успевает исчезнуть для расстояний, на которых проводилось построение модели.
- 2) стационарности нет из-за наличия тренда.

Хотя второй вариант является более правдоподобным, на практике чаще делается предположение о реализации первого. В этом случае для получения изотропной вариограммы можно попробовать преобразование:

$$h' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} h$$

где φ - угол, нормальный к направлению, в котором вариограмма имеет наибольшее значение плато.

Существует еще один вид анизотропии - анизотропия «самородка». Она означает различное поведение вариограмм вблизи 0 для разных направлений. Обычно наличие такого типа анизотропии вызывается коррелированностью ошибок измерений. На практике такая анизотропия не моделируется, лишь подбираются максимально подходящие модели (по индикаторам подгонки), имеющие одинаковое значение эффекта самородка для всех направлений.

В случае использования гнездовой структуры для моделирования анизотропной вариограммы необходимо строить ее так, чтобы все i -ые элементы (для всех направлений) имели одинаковую модель (сферическую, гауссову и т.п.) и одинаковое значение плато, но радиусы могут быть любые, в том числе и такие большие, чтобы скрывать анизотропию плато. В гнездовых структурах по всем направлениям должно быть одинаковое число элементов. Преобразования пространства делаются отдельно для каждого элемента, а в конечном результате опять получается линейная комбинация моделей.

В заключение нужно отметить, что анализ и моделирование пространственных корреляционных структур является ключевым моментом геостатистического анализа данных. Как правило, опытные геостатистики избегают автоматической подгонки вариограмм, больше опираясь на опыт, а также интерпретируемость анализа и моделирования. Дальнейшее использование промоделированных вариограмм - решение систем линейных уравнений. Каждый раз при появлении новых данных требуется проводить анализ и моделирование. В этом состоит суть адаптивности геостатистики (зависимость от качества и количества исходных данных и знаний по исследуемому месторождению).

2.3.4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВАРИОГРАММ

Вариограмма должна удовлетворять ряду строгих критериев: положительная определенность, поведение на бесконечности и в нуле. В процессе выполнения интерполяций методом кригинга используются теоретические модели вариограмм - непрерывные функции аргумента h , построенные на основе экспериментальных вариограмм, которые в свою очередь, известны только для конечного множества точек (лагов). Эти теоретические модели, следовательно, обязаны выбираться из класса функций, удовлетворяющих базовым свойствам вариограмм [101, 104].

Основные типы моделей вариограмм имеют названия, соответствующие именам функции, которые их моделируют. В результате экспериментальных исследований

Сферическая модель:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) & , \text{ для } h \leq a \\ c_0 + c & , \text{ для } h > a \end{cases} \quad (2.11)$$

Эффект самородков (Nugget). При расстоянии равном нулю, значение вариограммы также должно быть нулевым. Тем не менее, из-за ошибок, связанных с опробованием, невозможностью взятия проб на очень малых расстояниях и наличия в массиве высокочастотной изменчивости, которая проявляется на малых расстояниях (вариабельность) в реальных вариограммах почти всегда существуют отличные от нуля значения. Это нарушение непрерывности в начале вариограммной функции и является эффектом самородков (Рис. 2.24).

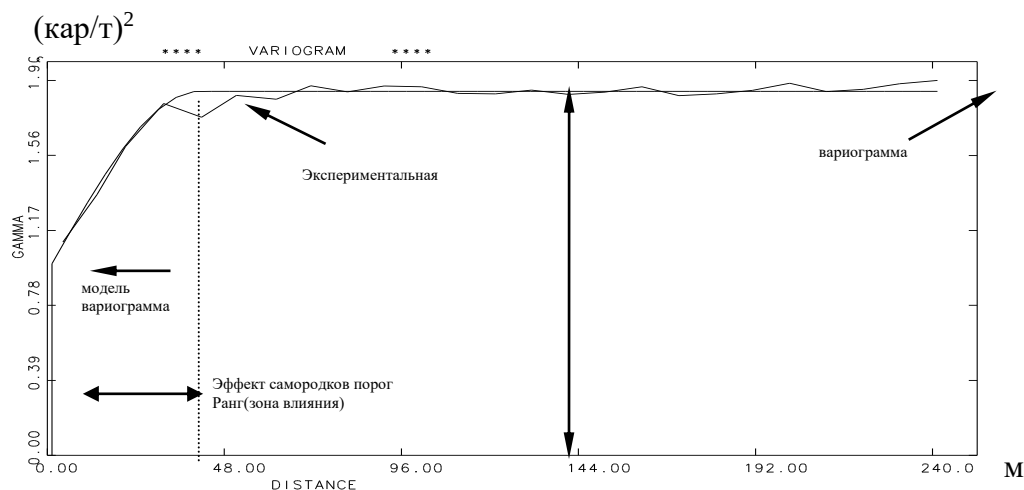


Рис. 2.24. Пример экспериментальной и модельной вариограммы кимберлитового месторождения

Вариограммный анализ обычно начинается с расчета изотропной вариограммы, когда не учитываются какие-то отдельные направления, а принимается во внимание только параметр h . Полученная функция не дает информации о вариограммах по направлению, кроме того, на изотропной вариограмме более четко выделяются различные структурные особенности массива, которые часто трудно различить по вариограммам по направлениям, хотя бы потому, что они рассчитываются по меньшему количеству пар проб. После получения достаточно надежной изотропной вариограммы, проводится анализ полученных данных. Каждая полученная вариограмма требует глубокого анализа и сопоставления с геологическими данными. Следует иметь в виду, что предельное расстояние, при котором вариограмму можно считать надежной, не превышает максимального расстояния между пробами в рассматриваемом направлении.

Для использования в геостатистических расчетах, экспериментальная функция должна быть заменена моделью, имеющей аналитическое описание (Рис. 2.25). Наиболее практически используемая при моделировании кимберлитовых месторождений является сферическая функция, с помощью которой может быть описано большинство экспериментальных функций [74]:

$$\gamma = C_0 + C_1 \left(\frac{1.5h}{A} - \frac{0.5h^3}{A^3} \right) \quad \text{при } h \leq A \quad (2.12)$$

где A - зона влияния (м);
 C_0 - эффект самородков;
 $C = C_0 + C_1$ - порог вариограммы.

Эта модель имеет линейное поведение в начале координат и порог, обычно равный дисперсии массива. Возрастая, функция достигает порога на расстоянии $h=A$. Касательная, проведенная к этой функции от начала координат, пересекает линию порога на расстоянии $h=2A/3$ от начала координат.

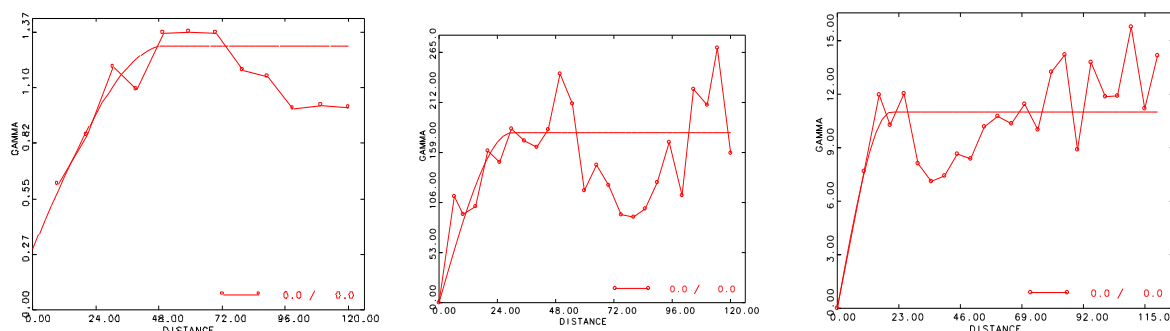


Рис. 2.25. Экспериментальные вариограммы и модели вариограмм трубки «Ботубинская»

Подбор моделей к полученным вариограммам может производиться как интерактивно, визуально, так и методами регрессионного анализа (наименьших квадратов). Второй способ позволяет получить более точные оценки, однако имеет некоторые ограничения, не позволяя эффективно использовать интуицию пользователя и вторичные знания об исследуемом массиве. Особенно осторожно необходимо подходить к оценке эффекта самородков (C_0), так как это самый влиятельный и чувствительный фактор модели.

2.3.5 РАСЧЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВАРИОГРАММ

При вычислении значений экспериментальных вариограмм расстояния между всеми парами рассеянных точек разбиваются на некоторое число интервалов или лагов. Дисперсии всех пар точек, чьи расстояния друг от друга попадают в один и тот же лаг усредняются. Результаты усреднения выводятся в виде графика зависимости экспериментальной вариограммы от расстояния, соответствующего большему или меньшему лагу. Это приводит к тому, что для каждого лага отображается лишь одна точка экспериментальной вариограммы.

Схема расчёта экспериментальной вариограммы для двумерного случая представлена на Рис.2.26.

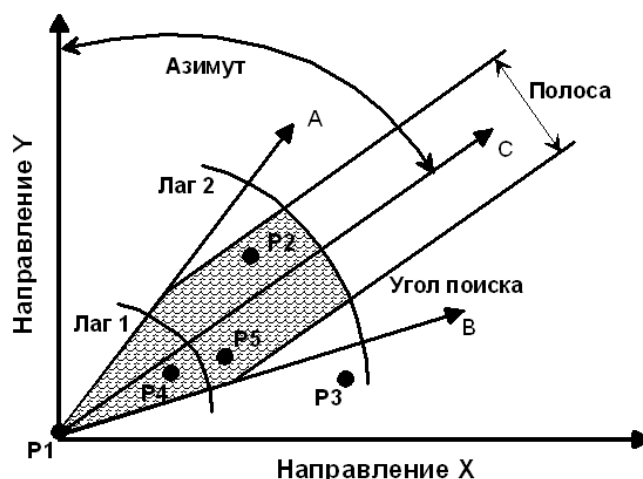


Рис.2.26. Схема расчета экспериментальной вариограммы

В программном обеспечении при вводе полного числа лагов и размера единичного лага одновременно указывается и допуск лага. Обычно величина допуска соответствует половине размера единичного лага.

Вычисляемые по исходным рассеянным точкам данных статистические функции называются *экспериментальными вариограммами*. В горно-геологическом программном обеспечении встречаются следующие типы вариограмм [26]:

1. Вариограмма. Данная функция является фактически полувариограммой и служит в качестве наиболее общего типа вариограмм. Значение вариограммы для некоторого лага h вычисляется как:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (f_{1i} - f_{2i})^2 \quad (2.13)$$

где N - число пар точек, чье совместные расстояния попадают в заданный интервал лага, и f_{1i} и f_{2i} - значения в начале и конце каждой пары точек.

2. Ковариация. Ковариация представляет собой обычно используемую в традиционной статистике функцию. Значение ковариации для лага h вычисляется как:

$$C(h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{2i} f_{1i} - m_{-h} m_{+h}) \quad (2.14)$$

где m_{-h} и m_{+h} - средние значения начала и конца соответственно.

3. Коррелограмма. Функция вычисляется по стандартной ковариации для значений стандартного отклонения показателя в начальных и конечных точках.

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{\sigma_{-h} \sigma_{+h}} \quad (2.15)$$

где σ_{-h} и σ_{+h} есть стандартные отклонения начальных и конечных значений соответственно.

4. Общая относительная вариограмма. Данная вариограмма вычисляется по стандартной вариограмме делением на квадраты средних значений в каждом интервале:

$$\gamma_{GR}(h) = \frac{\gamma(h)}{\left(\frac{m_{-h} + m_{+h}}{2}\right)^2} \quad (2.16)$$

5. Парная относительная вариограмма. В этой формуле каждая пара точек нормализуется делением на квадраты средних значений между начальным и конечным значениями.

$$\gamma_{PAR}(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \frac{(f_{1i} - f_{2i})^2}{\left(\frac{(f_{1i} + f_{2i})^2}{2}\right)} \quad (2.17)$$

Опыт показал, что генеральная относительная и парная относительная вариограммы эффективны при обнаружении пространственных структур и анизотропии при разреженном облаке рассеянных точек. Эти вариограммы можно использовать только при положительных отклонениях данных.

6. Логарифмическая вариограмма. Эта вариограмма вычисляется по уравнению в натуральных логарифмах значений данных:

$$\gamma_L(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (\ln(f_{1i}) - \ln(f_{2i}))^2 \quad (2.18)$$

7. Родограмма. Данная функция похожа на традиционную вариограмму за исключением того, что в расчетах используется корень квадратный из абсолютной разности, а не квадрат разности:

$$\gamma_R(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|f_{1i} - f_{2i}|} \quad (2.19)$$

8. Мадограмма. Функция аналогична традиционной вариограмме за исключением того, что используется не квадрат разности, а абсолютная разность значений признака в парных точках:

$$\gamma_M(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N |f_{1i} - f_{2i}| \quad (2.20)$$

Родограмма и мадограмма особенно эффективны для установления ранга и анизотропии, однако их нельзя использовать для моделирования эффекта самородков в вариограммах.

Для большого количества точек вычисление экспериментальной вариограммы может занять много времени. После завершения расчета экспериментальной вариограммы выполняют её аппроксимацию модельной функцией.

2.3.6 ПОДБОР МОДЕЛЕЙ ВАРИОГРАММ.

Все экспериментальные вариограммы строятся на пробах, имеющих определенный объем, отличный от точки. Довольно часто приходится обрабатывать данные нескольких видов опробования с разными размерами проб. При проведении расчетов чаще всего приходится распространять действия модели на самые различные объемы руды и породы. Для сравнения и объединения результатов необходимо исключить влияние на них объема проб, то есть привести модель к точечному основанию. Эта стадия изучения массива также является обязательной, если нельзя без серьезного искажения результатов допустить, что полученную модель можно признать точечной. Различают несколько простых, наиболее часто встречающихся, способов регуляризации:

- месторождение (исследуемый объем) разведано пробами одинаковой длины;

– рассматривается слой (или пласт) одинаковой мощности.

В этих случаях порог точечной вариограммы равен (для расстояния $h > 1$)

$$C = C_1 + \gamma(l), \quad (2.21)$$

где C – порог вариограммы с основанием l ,

а выражение:

$$\gamma(l) = \frac{l}{2a} - \frac{l^3}{20a^3} \quad (2.22)$$

зона точечной вариограммы для проб одинаковой длины равна $A = A_1 - l$, а для пластов – $A = A_1$.

Такая аппроксимация дает ошибку не более 10% в наиболее неблагоприятном случае и менее 1% в основных ситуациях, встречающихся на практике.

После расчета экспериментальной вариограммы необходимо выбрать тип модели и построить модель вариограммы для описания исходных данных. Данный процесс не полностью автоматизирован и часто требует некоторых суждений со стороны исследователя. Модельная вариограмма является лишь некоторой математической функцией, моделирующей тренд в экспериментальной вариограмме.

Как видно из Рис.2.27, форма вариограммы показывает, что на небольших расстояниях, дисперсия $\gamma(h)$ мала. Другими словами, точки расположенные ближе друг к другу имеют схожие значения $\gamma(h)$. На некотором расстоянии дисперсия значений становится несколько больше и модельная вариограмма выходит на асимптоту к значениям, соответствующим средней дисперсии.

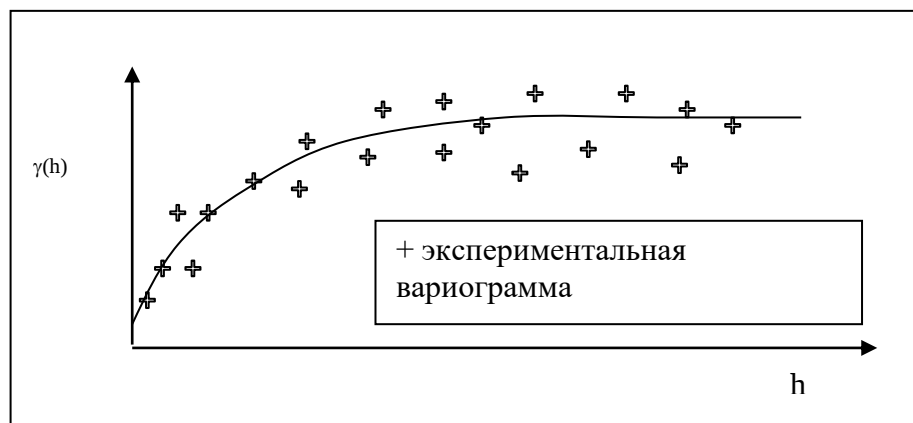


Рис.2.27. Построение модели вариограммы

Для аппроксимации экспериментальной вариограммы чаще всего используются следующие функции:

1. Сферическая модель, задаваемая рангом a и контрибуцией c как:

$$\gamma(h) = c \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ если } \frac{h}{a} \leq a \quad (2.23)$$

$$\gamma(h) = c, \text{ если } \frac{h}{a} > a$$

2. Экспоненциальная модель, задаваемая рангом a и контрибуцией c как:

$$\gamma(h) = c \left[1 - \exp \left(- \frac{3h}{a} \right) \right] \quad (2.24)$$

3. Гауссова модель, задаваемая рангом a и контрибуцией c как:

$$\gamma(h) = c \left[1 - \exp \left(- \frac{3h^2}{a^2} \right) \right] \quad (2.25)$$

4. Степенная модель, задаваемая степенью $0 < a < 2$ и наклоном c как:

$$\gamma(h) = ch^a \quad (2.26)$$

После нахождения модельной вариограммы наилучшим образом соответствующей исходной экспериментальной вариограмме она обычно является наглядной иллюстрацией изменчивости геологических признаков и служит для вычисления весовых коэффициентов интерполяции в процедуре кригинга. Исследуя полученный набор вариограмм, довольно часто трудно отдать предпочтение какой-то единственной модели. Единственное, что известно о месторождении (исследуемом объеме) – это содержание в пробах, поэтому наиболее качественной проверкой будет воспроизведение фактических данных, используя полученную вариограммную модель. Подобный метод носит название перекрестной проверки (cross-validation). При этом из массива данных исключается известная точка опробования, а затем производится оценка содержания в этой точке по соседним пробам и модели вариограммы. Сравнение фактического и оцененного содержания дает какую-то ошибку, а в целом по всему массиву – распределение таких ошибок и их среднее значение. Таким образом, по критерию минимальной ошибки существует возможность определить соответствие вариограммной модели в области последующего моделирования месторождения. В результате перекрестной проверки для исследуемой модели получают следующие данные:

- оценку содержания в пробе;
- дисперсия кригинга для этой оценки;
- число проб, по которым сделана эта оценка.

Используя корреляционный анализ, существует возможность произвести оценку полученных данных, то есть определить коэффициент корреляции исходных значений с расчетными, что является одним из основных показателей качества вариограммы.

2.3.7 ДИСПЕРСИЯ ОЦЕНИВАНИЯ

Дисперсия оценивания – одно из важнейших понятий геостатистики. Геостатистические методы оценивания имеют свойство одновременно с оценкой рассчитывать ее дисперсию. При этом расчетное значение дисперсии определяется точностью модельно-зависимых параметров (распределение, тренд, вариограмма и др.).

Любой оценочный метод дает некоторую ошибку в определении фактического параметра. Чем меньше исходной информации об исследуемом объекте, тем эта ошибка выше. В общем случае дисперсия оценки объема V по результатам опробования объема v определяется выражением:

$$\sigma^2 = 2\gamma(V, v) - \gamma(V, V) - \gamma(v, v)$$

где второй член суммы $\gamma(V, v)$ является средним значением вариограммы для всех пар точек объема V ; третий член суммы $\gamma(v, v)$ является средним значением вариограммы для всех пар точек объема v ; первый член суммы $2\gamma(V, v)$ равен среднему значению вариограммы для всех пар точек, одна из которых принадлежит объему V , а другая объему v .

Приведенная формула учитывает все многообразие форм, размеров и данных размещения объемов V и v . Так область V может состоять из двух различных блоков ($V=V_1+V_2$), а объем v состоять из образцов v_1 , часть из которых размещается в области v . Зная дисперсию оценки, можно найти доверительный интервал определения среднего показателя качества объема V по результатам опробования.

Очень важной является задача определения дисперсии оценки для больших объемов, состоящих из большого количества блоков для каждого элементарного блока дисперсия оценки рассчитывается при использовании метода кригинга. В случае, когда размеры блоков постоянны, а каждый блок оценен по центральной пробе со своей дисперсией оценки, то дисперсия оценки большого блока определяется из выражения:

$$\sigma_e^2 = \sigma^2 / n,$$

где n – число элементарных блоков в объеме V .

Если элементарные блоки неодинаковы, то суммарная дисперсия оценки равна:

$$\sigma_e^2 = \sum p_i^2 \sigma_{ei}^2 / \sum p_i^2$$

где p_i – объем элементарного блока v .

Нельзя не отметить, что исследуемый объект всегда в реальности сложнее, чем мы его видим по опробованию и можем смоделировать по геологическим соображениям. В соответствии с этим к дисперсиям, получаемым при кригинге, все равно приходится относиться как к некоторым относительным величинам, характеризующим точность расчетов по заранее заданным модельно-зависимым параметрам.

2.3.8 ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВАРИОГРАММ ТРУБКИ «УДАЧНАЯ»

Влияние стадии разведки месторождения на вариограмму.

На каждой стадии разведки кимберлитовых тел производится отбор проб с целью определения среднего содержания алмазов и оценки месторождения. Размер проб, геометрическое расположение в пространстве рудного тела и параметры сети имеют достаточно высокое влияние на вариограмму, модельные значения которой применяются при расчете и оценке содержаний алмазов в пространстве рудного тела. Для оценки влияния стадии разведки на вариограмму проведены расчеты по трубке «Удачная». Кимберлитовое месторождение трубка «Удачная» имеет достаточно высокую изученность, размер сети эксплоразведки 20х20м, что позволяет провести надежную оценку содержаний алмазов и исследования вариограмм.

Для исследований все скважины трубка «Удачная» были разделены по принадлежности к Восточному или Западному рудным телам. Дальнейшие расчеты проводились отдельно для каждого тела.

Западное рудное тело.

Рассчитаны вариограммы для стадии предварительной разведки, детальной разведки, стадии эксплоразведки и обобщенная вариограмма. Данные рассчитывались по результатам кернового опробования от поверхности до абсолютной отметки –120м. Как видно из Рис. 2.28 и данных Таблица 2.1, существует заметное отличие в параметрах вариограммы.

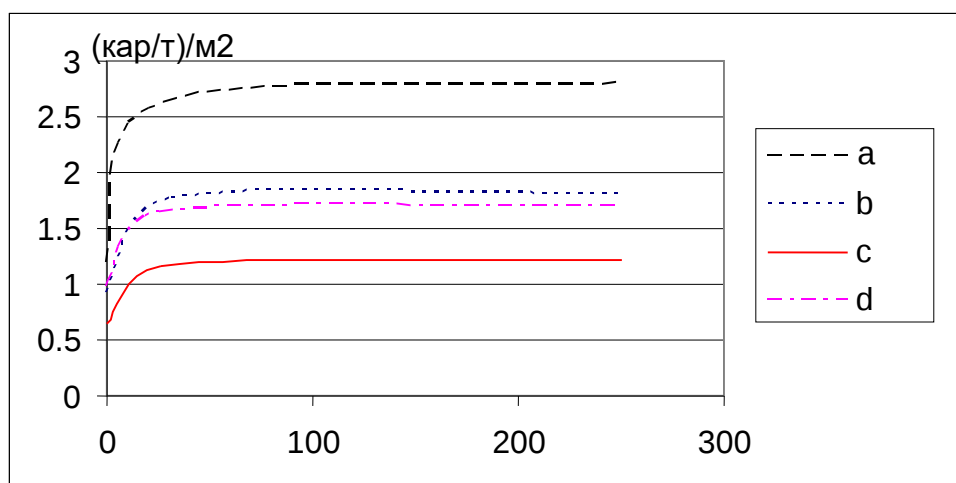


Рис. 2.28. Вариограммы трубки «Удачная» (западное рудное тело): а – по данным глубокого бурения; б – по данным эксплоразведки; с – по всем скважинам; д – по данным детальной разведки

Таблица 2.1. Параметры модели вариограмм Удачная (западное рудное тело)

Скважины	R	Cvalue	Sill	C0
Глубокая разведка	20.3	1.59	2.63	1.04
Детальная разведка	25	0.54	1.64	0.99
Эксплоразведка	26.5	0.51	1.16	0.65
Все	23.2	0.83	1.76	0.93

где R – ранг (радиус влияния пробы)

Cvalue – разница между порогом и эффектом самородков

Sill – порог вариограммы

C0 – эффект самородков

По данным подобранных значений вариограмм были рассчитаны объемные модели месторождения с размером ячеек 20х20х15м. В расчетах принимало участие 6700 проб. Основной задачей являлось определение влияния параметров вариограммы на точность оценки месторождения. В результате расчетов получены данные – дисперсия оценки содержаний при применении различных вариограмм:

- вариограмма по всем скважинам – дисперсия 0.3357 (кар/т)^2
- вариограмма по эксплоразведочным скважинам – дисперсия 0.193 (кар/т)^2 .

Восточное рудное тело.

Восточное рудное тело также имеет скважины глубокого бурения и скважины стадии эксплоразведки. По данным кернового опробования отстроены вариограммы и подобраны к ним модели (Рис. 2.29).

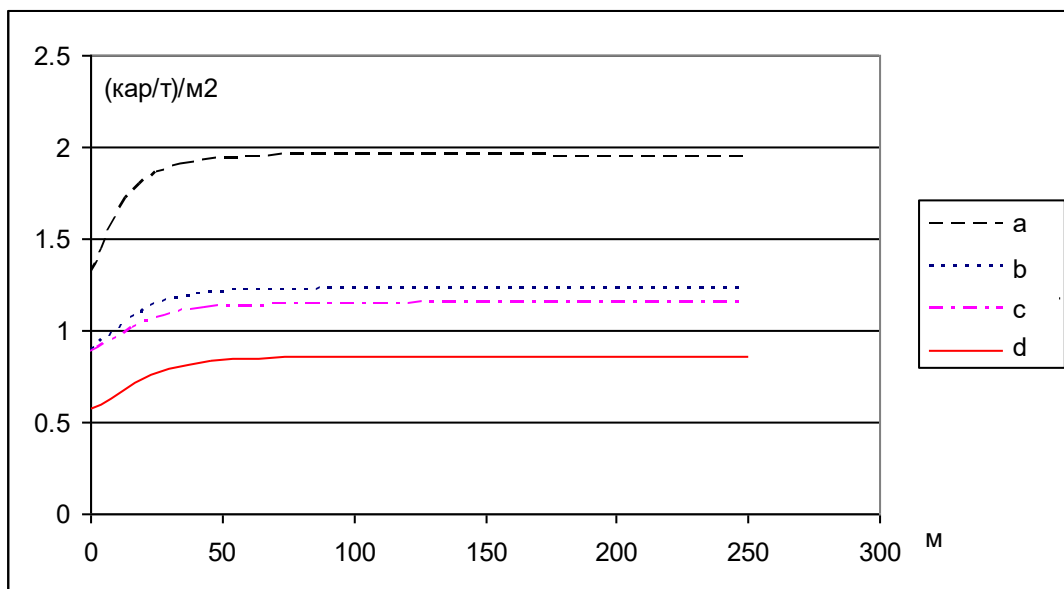


Рис. 2.29. Вариограммы трубки «Удачная» (восточное рудное тело)

a – по данным глубокого бурения; b – по данным эксплоразведки;

c – по всем скважинам. d – по данным детальной разведки

Модельные параметры вариограмм по Восточному телу представляет следующая таблица..

Таблица 2.2. Параметры модели вариограмм Удачная (восточное рудное тело)

Скважины	R	Cvalue	Sill	C0
Глубокая разведка	34.5	0.6	1.9	1.3
Детальная разведка	43.3	0.27	1.19	0.9
Эксплоразведка	45.9	0.254	0.834	0.58
Все	40.2	0.15	0.989	0.871

где R – ранг (радиус влияния пробы)
 Cvalue – разница между порогом и эффектом самородков
 Sill – порог вариограммы
 C0 – эффект самородков

По данным подобранных значений вариограмм были рассчитаны объемные модели месторождения с размером ячеек 20х20х15м. В расчетах принимало участие 4311 проб. В результате расчетов получены данные – дисперсия оценки при применении различных вариограмм:

- вариограмма по всем скважинам – дисперсия 0.30
- вариограмма по эксплоразведочным скважинам – дисперсия 0.23.

Влияние на вариограмму параметров сети опробования.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния параметров эксплоразведочной сети на вариограмму. Для этого было произведено разрежение сети эксплоразведочного опробования до размеров от 100х100м до 20х20 м с шагом 20м, интервал опробования при этом по скважинам составляет 15м. Для Восточного и Западного рудного тела вариограммы рассчитывались отдельно (Таблица 2.3). Результаты расчетов и подобранные модели вариограмм представлены на Рис. 2.30.

Таблица 2.3. Параметры вариограммы при различной сети эксплоразведочного бурения.

	Размер сети	R	Cvalue	Sill	C0
Восточное тело	100х100	25.1	0.61	1.28	0.67
	80х80	27	0.52	1.46	0.94
	60х60	33.9	0.49	1.22	0.73
	40х40	39.1	0.83	1.28	0.45
	20х20	45.6	0.22	1.24	1.02
	Размер сети	R	Cvalue	Sill	C0
Западное тело	100х100	22	0.77	1.04	0.57
	80х80	27.8	0.25	1.02	0.77
	60х60	32.2	0.54	1.05	0.51
	40х40	33	0.24	1.16	0.92
	20х20	33.2	0.39	1.13	0.74

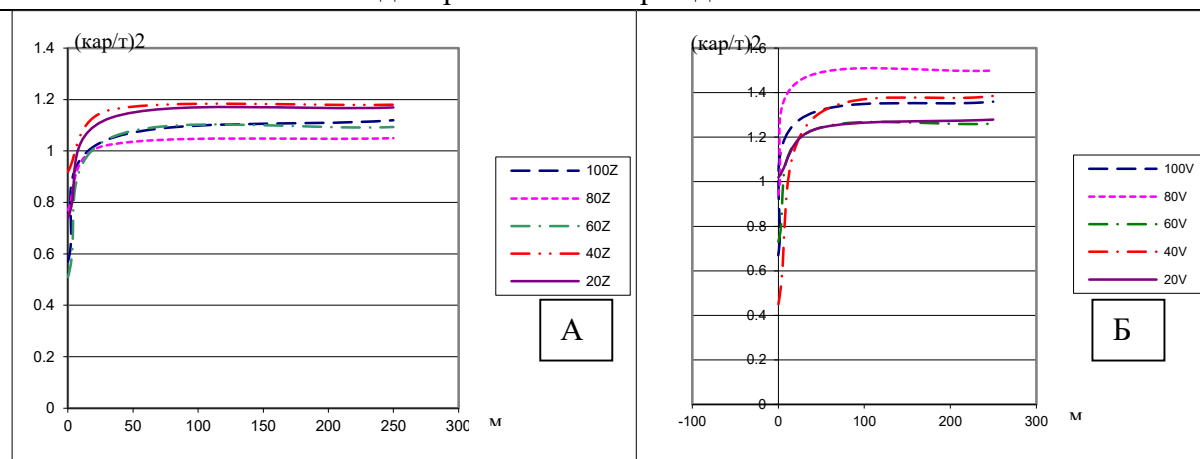


Рис. 2.30. Вариограммы Западного (А) и Восточного (Б) рудного тела при различной плотности сети эксплоразведки

В идеальном случае (при строго равномерном распределении качества руды) следовало бы ожидать увеличение ранга (радиуса влияния пробы), снижение Sill (порога вариограммы) до определенного значения, после которого, независимо от размеров сети изменения порога будут практически незаметны и уменьшения эффекта самородков (C0). Фактические вариограммы не подтверждают этого предположения, кроме увеличения радиуса влияния пробы.

Анализ полученных вариограмм позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением плотности сети опробования происходит увеличение ранга;
- порог вариограммы изменяется в незначительных пределах;
- эффект самородков – наиболее чувствительный элемент вариограммы, носит непредсказуемые изменения и зависит в основном от изменчивости исходных данных на малых расстояниях.

Поскольку технологически практически все пробы эксплоразведочных данных обрабатывались по единой методике и на одном предприятии, можно сделать вывод значительной изменчивости содержаний в зависимости от выбранной сети опробования. Полученные данные говорят об особенностях распределения содержаний алмазов в пространстве рудного тела, высокой изменчивости на малых расстояниях.

Одной из важных особенностей полученных вариограмм является то, что при увеличении ранга вариограммы при сгущении сети опробования, происходит снижение значений эффекта самородков. Для выявления зависимости были рассчитаны значения разности между рангами и эффектами самородков и их градиентом в общем для трубки «Удачная» (Таблица 2.4).

Таблица 2.4. Изменение параметров вариограмм в зависимости от размера сети наблюдений.

Размер сети	R	C0	R-R'	C0-C0'	C0-C0'/R-R'
Восточное тело					
100x100	25.1	0.61			
80x80	27	0.94	1.9	0.33	0.17
60x60	33.9	0.73	6.9	0.21	0.03
40x40	39.1	0.45	5.2	0.28	0.05
Западное тело					
100x100	22	0.57			
80x80	27.8	0.77	5.8	0.2	0.03

60x60	32.2	0.51	4.4	0.26	0.06
40x40	33	0.92	0.8	0.41	0.51

По полученным данным определена зависимость (Рис. 2.31), характеризующая изменчивость эффекта самородков от величины изменения ранга вариограммы.

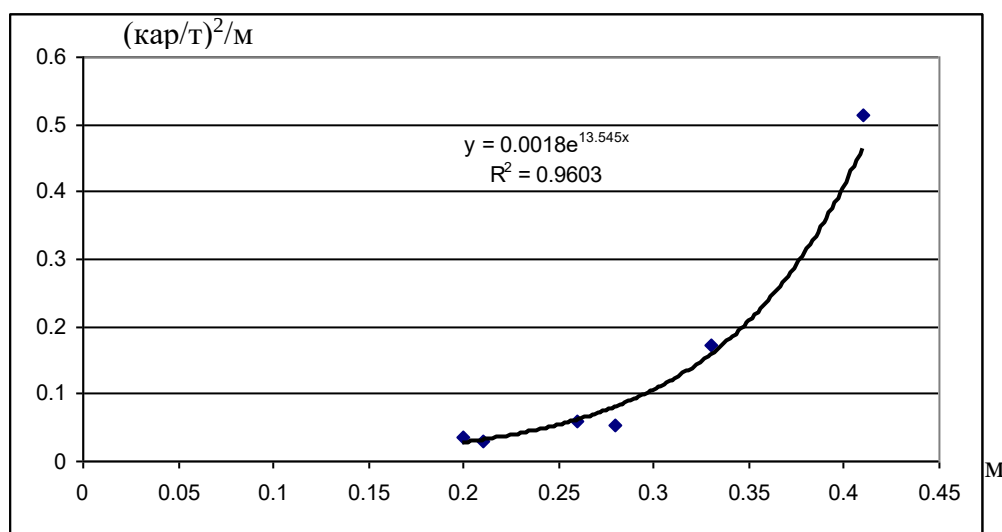


Рис. 2.31. Зависимость эффекта самородка от величины ранга вариограммы

Определенная зависимость обусловлена тем, что при увеличении ранга (радиуса влияния) в заданную область попадает большее количество проб, влияющих на эффект самородков. Таким образом, увеличение радиуса влияния пробы характеризуется меньшей изменчивостью эффекта самородков.

Влияние на вариограмму содержания алмазов

При расстоянии равном нулю, значение вариограммы также должно быть нулевым. Тем не менее, из-за ошибок связанных с опробованием, а также в связи с невозможностью взятия проб на очень малых расстояниях и наличия в массиве высокочастотной изменчивости, проявляющейся на малых расстояниях, в реальных вариограммах почти всегда существуют отличные от нуля значения. Это нарушение непрерывности в начале вариограммной функции является эффектом самородков.

Дальнейшие исследования касались определения влияния на эффект самородков содержания алмазов. Для этого, на примере трубки «Удачная» отстраивались вариограммы по Восточному и Западному рудному телу отдельно. При расчетах вариограммы использовались как все значения, так и ограниченные до определенного предела (содержания алмазов ниже 20 карат на тонну, ниже 15 и т.д.). К полученным вариограммам подбирались модели, результаты модельных параметров. Полученные результаты дают основание определить очень важную линейную зависимость между порогом и эффектом самородков (Рис. 2.32)

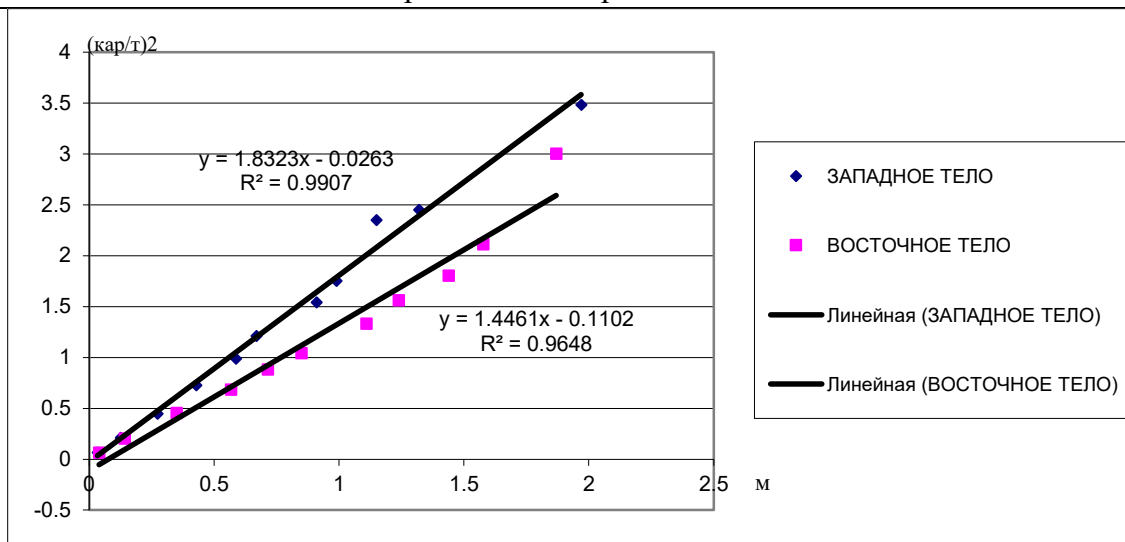


Рис. 2.32. Зависимость изменения эффекта самородков от порога вариограммы

Таким образом, существует линейная зависимость изменения эффекта самородков от порога вариограммы, причем для каждого рудного тела эта зависимость выражается своим уравнением.

Влияние на вариограмму композитных проб.

При расчете вариограмм рекомендуется произвести предварительную обработку исходных данных с целью применения в дальнейших расчетах проб одинаковой длины, веса и т.д., то есть провести параметризацию. В этом случае наиболее целесообразно производить отбор проб заранее одинаковой длины и на определенных горизонтах, что, в общем то, и соблюдается на алмазоносных месторождениях. Тем не менее, изучение влияния группировки и составления композитных проб на вариограмму – задача, необходимая в случае объединения выборок с различными параметрами пробоотбора. Для определения воздействия объединения проб по интервалу производилось составление композитных проб с интервалом от 15 до 60 м на примере трубки «Удачная». По полученным данным рассчитывались вариограммы и проводился подбор модели к экспериментальным значениям вариограмм. Результаты расчетов представлены в Таблица 2.5.

Таблица 2.5. Результаты расчета вариограмм по композитным пробам.

Интервал объединения	C0	R	CVALUE	SILL
15м	0.91	30.4	3.67	4.58
20м	0.4	34.8	3.85	4.25
30м	0.16	41.8	3.76	3.92
40м	0.031	45.4	2.67	2.7
50м	0.014	55.7	2.476	2.49
60м	0.005	63.8	2.285	2.29

Анализ параметров показывает, что при увеличении интервала объединения проб происходит заметное снижение порога и эффекта самородков (практически исчезает при объединении на интервале более 40м), происходит увеличение ранга (радиуса влияния пробы). Таким образом, составление композитных проб в диапазоне более существующего интервала опробования дает в результате искажение вариограммы, что впоследствии сказывается и на снижении точности оценки месторождения в целом.

Влияние лага на вариограмму.

При расчете вариограммы требуется задать несколько параметров, связанных с расстоянием – лаг и допуск лага, то есть расстояние по обе стороны от лага, которое определяет интервал отбора проб для анализа. В случае расположения проб по регулярной сети, выбор величины лага не представляет особой трудности. Обычно он равен самому интервалу сети или интервалу опробования. На практике регулярная сеть в начальной стадии оценки месторождения практически отсутствует. Скважины расположены «случайным» образом и в этом случае целесообразно принять для анализа среднее расстояние между центрами проб. Допуск лага обычно принимается равным половине величины лага. В некоторых трудных случаях допуск лага можно увеличить, но не более значения самого лага. Вариограммный анализ обычно начинается с расчета изотропной вариограммы, когда не учитываются какие-то отдельные направления, а принимается во внимание только параметр h . Полученная функция не дает информации о вариограммах по направлению, и может быть использована главным образом для расчета функций по направлениям. Кроме того, на изотропной вариограмме более четко выделяются различные структурные особенности массива, которые часто трудно различить по вариограммам по направлениям, хотя бы потому, что они рассчитываются по меньшему количеству пар проб.

Для выявления особенностей поведения вариограммы при изменении величины лага были рассчитаны вариограммы по данным глубокой разведки Западного тела трубки «Удачная». Значения лага менялись от 15 до 60 м, при неизменных остальных параметрах расчета вариограммы. Результаты расчетов – фактические вариограммы представлены на Рис. 2.33.

Как видно из представленных графиков, изменение величины лага дает в основном сглаживание структурных особенностей распределения содержаний алмазов и изменение эффекта самородков. Эффект самородков увеличивается с увеличением лага и на определенном этапе становится практически невозможно определить его значение. Порог вариограммы (SILL) практически остается неизменным.

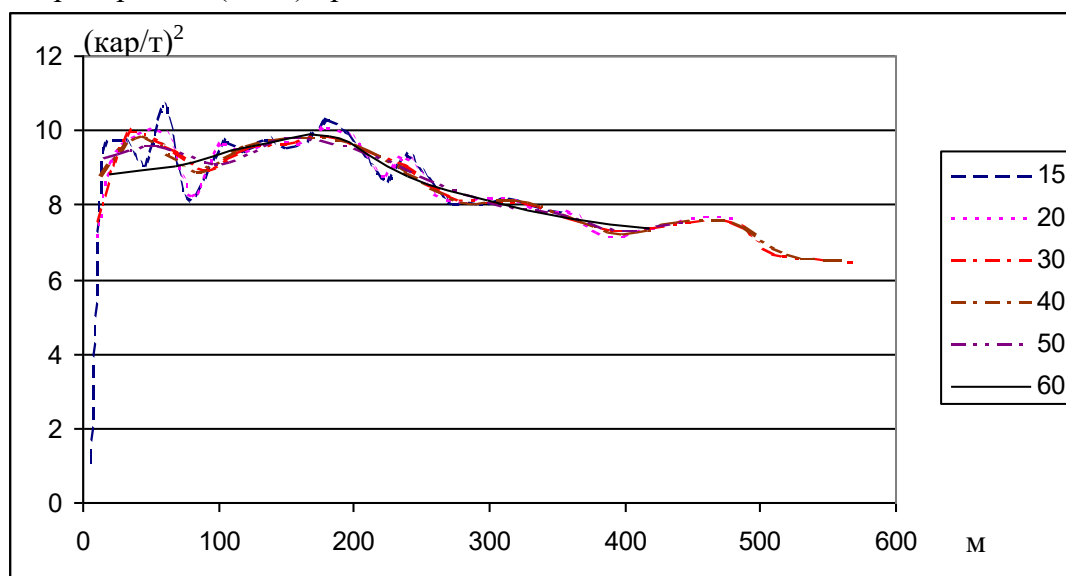


Рис. 2.33. Вариограммы по данным глубокого бурения с различным лагом

2.4 ОКОНТУРИВАНИЕ РУДНЫХ ТЕЛ

Моделирование и оценка месторождения производится в пределах некоторого оцифрованного контура залежи, группы рудных тел или, для кимберлитовых месторождений, алмазоносной трубки. Контуром обычно является естественная граница между рудой и вмещающими породами, некоторый условный контур, в пределах которого руда удовлетворяет заданным кондициям по мощности, содержанию полезных

и вредных компонентов, или по границе разведанности месторождения – в контуре той или иной категории запасов.

Установление перечисленных контуров на планах и разрезах по данным геологоразведочных и горных работ называется оконтуриванием месторождения. Различают внутренний и внешний, или нулевой, контуры. Внутренним называют контур, проходящий по граничным выработкам, обнаружившим полезное ископаемое. Внешним называют контур, проходящий через точки естественной границы распространения полезного ископаемого или, в случае невозможности установления последней, через точки, находящиеся между рудными и соседними с ними безрудными выработками.

Площадь между внутренним и внешним контурами месторождения называют *межконтурной или приконтурной* полосой. Построение внутреннего контура обычно не вызывает затруднений. Построение внешнего контура требует знания геологических особенностей месторождения.

Различают два случая.

1. Построение контура в условиях ограниченной экстраполяции, когда контур проводят между рудной и безрудной выработками посередине между ними или по разрезам с учетом среднего угла выклинивания рудной залежи.
2. Оконтуривание в условиях неограниченной экстраполяции, когда безрудных выработок нет или они расположены слишком далеко от рудных. В этом случае внешний контур проводят по точкам, построенным с учетом только рудных скважин. Точность построения контура в этом случае весьма низкая.

Применяемые способы построения контура подразделяются на геологические, морфологические и формальные.

Геологические способы основаны на учете приуроченности некоторых типов месторождений к определенным геологическим структурам с известными границами, к крупным разрывным нарушениям, к границам смены продуктивных пород, фаций и т.п.

Морфологические способы применяют с использованием разрезов. По данным разведочных выработок строят разрезы и линии, оконтуривающие кимберлитовую трубку. Линии экстраполируют за пределы внутреннего контура до их пересечения. По отмеченным на плане точкам проводят внешний контур.

Формальные способы применяют в тех случаях, когда не могут быть использованы геологические и морфологические приемы. Их связывают или с параметрами разведочной сети системой разработки, или с размерами тел по простиранию и по падению. Внешний контур проводят параллельно внутреннему на расстоянии, равном среднему расстоянию между разведочными выработками или его половине. Иногда внешний контур проводят за пределами внутреннего на два этажа (горизонта горных работ) - для выдержанных месторождений и на один этаж - для менее выдержанных (слюдоносные пегматиты, жильные месторождения редких металлов и т.п.). Внешний контур строят по “правилу треугольника”, высота которого равняется половине длины тела полезного ископаемого по простиранию.

Для изометрических тел внешний контур проводят в виде конуса или полушария. Лучшими приемами определения внешнего контура следует считать такие, которые исходят не из формальных соображений, а из геологических особенностей месторождения полезного ископаемого.

В практике подсчета запасов в пределах внешнего контура приходится оконтуривать балансовые или кондиционные запасы, удовлетворяющие определенным требованиям по мощности залежи, содержанию полезных или вредных компонентов, технологическим свойствам как в отдельности так и совместно.

2.5 ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ СЕТИ ОПРОБОВАНИЯ

Для определения достоверности выбранной сети геологического опробования на примере трубки «Юбилейная» было проведено имитационное моделирование с различными размерами сети буровых скважин для двух различных по общему содержанию и петрографическим характеристикам геологических блоков (блок “А” и блок “Б”). Имитационное моделирование проводилось методом вращающихся лент с применением пакета программ GSL (Геостатистическая библиотека Oxford C University Press, New York, 1992.). Суть метода заключается в том, что на основании пространственной характеристики исследуемого признака с учетом изменчивости генерируется достаточное количество значений содержаний алмазов для данной области. Эти значения определяют наиболее вероятную величину исследуемого признака в данной точке, на заданной площади или в заданном объеме. Для этого используется вид распределения признака, определяются параметры вариограммы, приведенной к точечному основанию, а также задаются размеры сети опробования. Производится большое количество моделирований, обычно 200-500 и более для каждой, заранее выбранной сети опробования. Такое моделирование полезно также как средство визуального представления структуры минерализации на данном месторождении. Изучение структуры распределения минерализации признака дает представление о наличии богатых и бедных зон минерализации, возможных размерах этих зон, распределение их в пространстве, а также о степени влияния пробы при моделировании [53, 46].

Моделирование методом вращающихся лент (Рис. 2.34) проводилось для площади различных размеров.

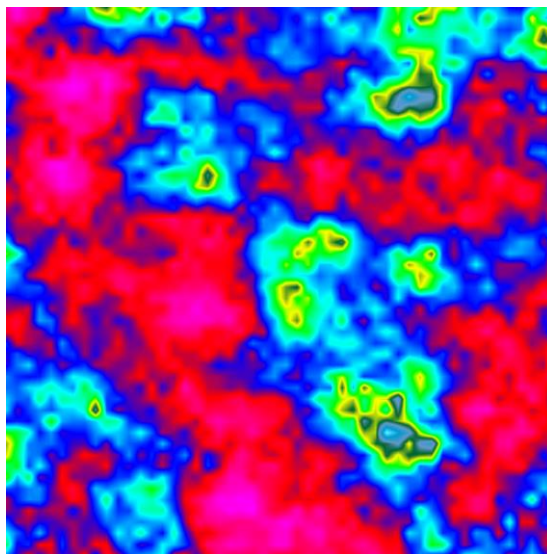


Рис. 2.34. Пример моделирования методом вращающихся лент содержания алмазов кимберлитового месторождения для площади размером 100x100 м.

Методика определения достоверности геологического опробования на трубке “Юбилейная” с использованием метода имитационного моделирования заключалась в следующем:

- создание исходных файлов геологического опробования для геологических блоков из существующего общего файла опробования;
- расчет вариограмм, подбор моделей вариограмм и определение статистических параметров исходных выборок;
- трансформация исходных данных для последующего моделирования;

- имитационное моделирование с различными размерами сеток геологического опробования (для каждой сети было проведено 250 реализаций);
- обратная трансформация полученных результатов моделирования, расчет полученных данных, построение графиков и анализ результатов.

Результаты проведенных исследований приведены в виде графиков зависимости (Рис. 2.35), на которых по оси “Х” отложены моделируемые сети опробования, а по оси “У” - вероятность определения оценки геологических блоков. Общее содержание алмазов по блоку “А” по результатам проведенной эксплуатационной разведки является несколько ниже по отношению к другим блокам и весьма неравномерно распределенным в пространстве. По данным проведенного моделирования и по графику для блока “А” видно, что существующая на данном этапе размер сети геологического опробования (20х20м) дает возможную ошибку в определении общей оценки геологического блока в пределах 12-15%. Было установлено, что изменение размеров сети опробования до 10х10м не даст положительных результатов в уточнении оценки блока и только увеличит затраты на производство дополнительных работ, связанных со сгущением сети горно-геологических выработок.

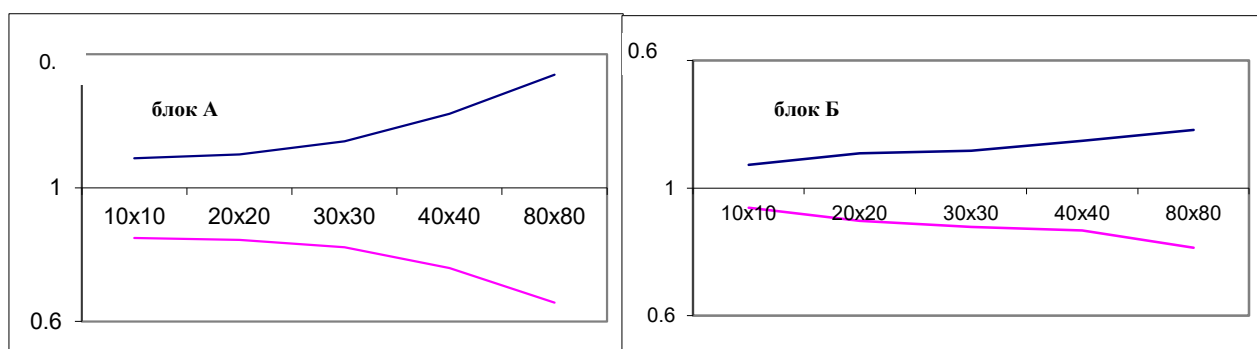


Рис. 2.35. Зависимость вероятности оценки геологических блоков от размера сети опробования для тр. “Юбилейная” (по оси Х – размеры сети опробования, по оси Y – вероятность)

Дальнейшие исследования касались точности определения контуров рудного тела и геологических блоков в зависимости от выбранной сети скважин эксплуатационной разведки. Исследования проводились с использованием пакета программ Datamine и заключались в определении возможных контуров геологических блоков при различных размерах сети горных выработок. Размеры сети буровых скважин изменялись от 80х80 м до 10х10м. Обобщенный график (Рис. 2.36), учитывает достоверность оценки геологических блоков и надежность определения их контуров в зависимости от выбранного размера сети. На представленном графике не учитывается петрографические разновидности кимберлитов и сложность геологического строения кимберлитового тела.

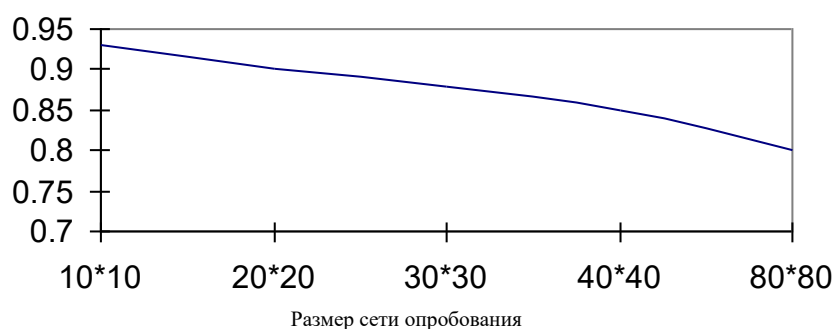


Рис. 2.36. Зависимость вероятности оценки и надежности оконтуривания геологических блоков от размеров сети эксплоразведочных скважин (по оси x – размеры сети опробования, по оси y – вероятность).

Проведенные исследования позволяют определить оптимальные размеры сети геологического опробования и дают возможность применения исходных данных для последующего моделирования и расчета оценки геологических блоков с вероятностью, достаточной для надежного планирования и ведения горно-геологических работ.

Немаловажным фактором, влияющим на достоверность оценки геологических блоков, является интервал опробования, принимаемый обычно равным высоте уступа на действующих карьерах предприятий. Для определения влияния величины интервала опробования на трубке "Юбилейная" был выбран блок руды с относительно равномерным распределением полезного компонента в пространстве и единой петрографической разновидности кимберлита. Был смоделирован геологический блок с размером сети опробования 20x20м и различными интервалами опробования (5,10,15,20 и 30м). Для каждого интервала было проведено по 250 реализаций распределения содержаний алмазов с использованием методом имитационного моделирования - метода вращающихся лент. Результаты приведены в виде графика на Рис. 2.37.

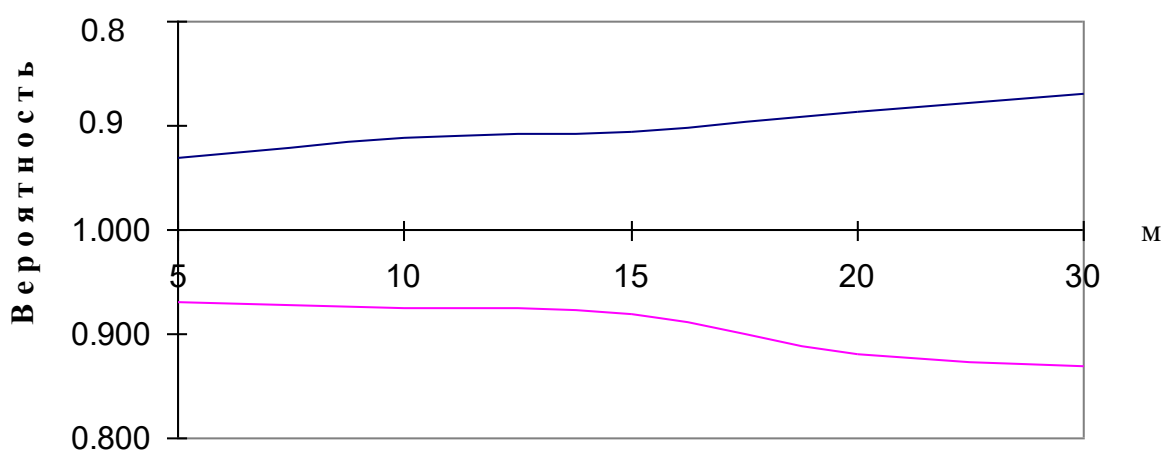


Рис. 2.37. Зависимость вероятности оценки взрывного блока от различных интервалов опробования.

Как видно из приведенного графика оптимальным размером интервала опробования является интервал равный 15м. Уменьшение величины интервала для исследуемого типа руды не приведет к значительному уточнению оценки блока кимберлитов исследуемой петрографической разновидности.

2.6 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОРУДЕНЕНИЯ

Прогнозирование развития оруденения и морфологии рудных тел на слаборазведанных участках залежи и нижележащих горизонтах является важнейшей задачей геологического моделирования, позволяющей в ряде случаев существенно уменьшить объём геологоразведочных работ и эксплуатационной разведки на разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых.

Среди методов прогнозирования можно выделить следующие:

- Интерполяционные и экстраполяционные;
- Статистические и стохастические;
- Эвристические (интуитивные) и экспертные (аналитические);

По видам прогнозы разделяют на поисковые, нормативные, интервальные, точечные. По временным срокам - на оперативные (оперативно-календарное планирование) до 1 месяца; текущие (краткосрочное планирование) - от 1 месяца до 1 года; перспективные (среднесрочное планирование) - от 1 года до 5 лет; долгосрочные (долгосрочное планирование) - от 5 до 15 лет; и дальнесрочные - свыше 15 лет.

Точность прогноза - оценка доверительного интервала прогноза для заданной вероятности его осуществления. *Достоверность прогноза* - оценка вероятности осуществления прогноза для заданного доверительного интервала. *Ошибка прогноза* - величина отклонения прогноза от действительного состояния объекта.

Прогнозный горизонт — максимально возможный период упреждения прогноза заданной точности. Обычно считают, что интервал упреждения прогноза не должен превосходить одной трети исходного ряда. Пути повышения эффективности прогнозирования заключаются в синтезе различных методов. Мерой качества прогнозов является отношение числа прогнозов, подтвержденных фактическими данными, к общему числу прогнозов.

Прогноз горно-геологических условий представляется в виде комплекта горно-геометрических планов, разрезов, карт, на которых изображается размещение различных горно-геологических и горнотехнических показателей месторождения (гипсометрии и мощности залежи, тектонической нарушенности, качества полезного ископаемого, его технологических свойств и т. п.). Наибольшую точность прогнозных построений получают путем обобщения наблюдений при разведке и эксплуатации, по материалам хорошо поставленной геолого-маркшейдерской службы горного предприятия на основе точной и эффективной геометризации показателей месторождения.

По способу получения информации для прогнозирования в настоящее время выделились геологические и геофизические методы прогнозирования показателей. Геофизические методы требуют применения при прогнозе специальной аппаратуры, методов измерения и обработки информации.

Геологические методы в зависимости от способа обработки и вида получаемой информации можно разделить на качественные и количественные. К *качественным* методам относят прогноз на основе общих геологических предпосылок, простой и сложной аналогии и т. д. Общий смысл этих методов заключается в установлении качественных генетических связей между различными показателями залежи (например, между мощностью пласта и алмазонасностью вмещающей толщи пород), выделении по ним различных геологических типов пород и зональностей, экстраполяции или интерполяции на основе найденных связей границ зон и соответствующего им размещения показателей.

Количественные методы прогнозирования основаны на математическом моделировании геологических структур (блочном-каркасном, стохастическом, регрессионном, горно-геометрическом и т.д.) и выявлении функциональных закономерностей размещения прогнозируемых показателей и вмещающей толщи пород.

Прогноз, полученный на основе количественных методов, только тогда можно считать достоверным, если он подтверждается вскрытыми качественными

генетическими закономерностями. Иными словами, количественный прогноз должен получить качественную геологическую интерпретацию, не противоречащую общим генетическим концепциям о месторождении. Вместе с тем количественный прогноз может стать основой для новых качественных геологических построений. Поэтому единство качественных и количественных сторон размещения показателя при его прогнозировании имеет решающее значение. Для прогнозирования размещения показателя характерны два типа прогноза: *интерполяционный* и *экстраполяционный*.

Интерполяционный прогноз осуществляется в пространстве залежи между точками определения показателя и опирается на эти точки. Исходной при интерполяционном прогнозе является гипотеза о непрерывном (по П. К. Соболевскому) и однородном размещении прогнозируемого показателя между точками его опробования.

Экстраполяционный прогноз используется для описания закономерностей размещения показателя за границами разведанной площади. Этот тип прогноза основывается на гипотезе о сохранении вскрытой на разведанном участке залежи закономерности размещения показателя в прилегающей к этому участку области экстраполяционного прогноза.

Методы интерполяционного и экстраполяционного прогнозирования принципиально не отличаются друг от друга. Однако подход к оценке точности этих типов прогноза различен. Экстраполяционный прогноз имеет следующие источники ошибок:

- 1) технические ошибки измерения показателя;
- 2) ошибки в зоне интерполяции, прилегающей к прогнозируемой области экстраполяции;
- 3) нарушение однородности размещения показателя в области экстраполяции по сравнению с прилегающим к ней разведанным участком.

Наиболее опасным является третий источник, влияние которого хуже всего предсказуемо и пока имеет слабое теоретическое обоснование. Надежность интерполяционного прогноза определяется только техническими ошибками и ошибками интерполирования, законы накопления которых изучены гораздо полнее. Отсюда методы оценки точности интерполяционного прогноза разработаны лучше и они отличаются от таковых при экстраполяционном прогнозировании.

В теории прогнозирования по промежутку времени, на который рассчитан прогноз, различают, как уже отмечалось, оперативные, кратко-, средне-, долго-, и дальнесрочные (сверхдолгосрочные) прогнозы. При прогнозировании размещения показателей месторождения эти виды прогноза отличаются масштабом прогнозных горно-геометрических планов и детальностью изображения вскрытых закономерностей размещения показателей.

Так, оперативному и краткосрочному прогнозу в этой классификации соответствуют горно-геометрические планы размещения показателей, построенные по наиболее полным данным эксплуатационной и детальной разведки в масштабах и с детальностью, необходимой для составления месячных квартальных и годовых текущих планов развития горных работ. Среднесрочный прогноз выполняется по горно-геометрическим планам размещения показателей, построенным по данным детальной разведки для перспективного пятилетнего планирования развития горных работ. Долгосрочный и дальнесрочный прогноз размещения показателей необходим для составления генерального плана развития горных работ предприятия на весь срок его существования. Так как общий срок службы горного предприятия исчисляется десятками лет, то генеральный план разрабатывается по укрупненным производственным показателям. Это позволяет для долгосрочного прогноза использовать мелкомасштабные горно-геометрические планы и карты, выявляющие наиболее общие тенденции в размещении показателей.

Прогнозирование минерализации и строения залежей с множеством разнообразных структурных элементов и рудных тел во многих случаях может быть эффективно выполнено с помощью методов стохастической геометрии. Одним из разделов стохастической геометрии является стереология, в рамках которой рассматриваются прикладные вопросы реконструкции пространственных геометрических (в том числе – геологических) структур на основе измерений, проведенных по точкам (опробование массива), вдоль линий (разведочные выработки) или на секущей плоскости (разрезы по профилям или горизонтам месторождения).

Имитационное моделирование является альтернативным подходом пространственной интерполяции. Оно позволяет оценить пространственную изменчивость и неопределенность данных. В отличие от детерминистических интерполяторов и геостатистических оценок, которые усредняют и сглаживают вариабельность исходных данных, имитационное моделирование позволяет воспроизвести случайный пространственный процесс на основе определенных качественных и количественных критериев исходного распределения. В то время как интерполяционная оценка в точке единственна для заданной модели и ее параметров, результатом стохастического моделирования является набор оценок (реализаций) значения функции в точке для заданной модели. Имитационное моделирование позволяет сгенерировать множество равновероятных реализаций, обладающих следующими свойствами исходного распределения:

- одинаковой с исходным процессом плотностью распределения;
- одинаковой пространственной корреляционной структурой.
- точное воспроизведение исходных данных.

Цели и задачи моделирования и оценивания различны: моделирование призвано оценить пространственную изменчивость и неопределенность данных путем оценки совместной кумулятивной функции распределения, а также получить вероятностные оценки. Такие оценки, а также анализ неопределенности пространственной оценки, крайне важны для поддержки принятия квалифицированных решений. Методы основываются на предположении, что анализируемые данные являются реализациями случайного процесса. Это позволяет, используя имеющиеся измерения как зафиксированные значения (условное моделирование), получить бесконечно много новых реализаций переменной в точке оценивания. Построенные таким образом стохастические реализации обладают той же функцией распределения и такой же пространственной корреляционной структурой, что и исходные данные. Наличие нескольких равновероятных оценок в одной точке позволяет оценить неопределенность оценивания и построить вероятностные оценки.

С помощью методов имитационного моделирования на начальном этапе расчетов по оценке запасов решается задача определения достоверности сети и интервала опробования, погрешности геометризации, а также выбор оптимальных размеров сети буровых скважин на стадии эксплуатационной разведки.

2.7 ИМИТАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ СЕТИ ОПРОБОВАНИЯ

Одним из важных элементов оценки любого месторождения является опробование. Опробование, в свою очередь, зависит от стадии разведки месторождения и от размеров сети горных выработок, применяемых на данной стадии. Представительность опробования зависит также и от многих других факторов, однако важнейшую роль занимает размер сети буровых скважин. На месторождениях, где минерализация носит равномерный характер распределения в объеме рудного тела, выбор размеров сети геологического опробования не представляет особых трудностей. Более сложной задачей является определение оптимального размера сети буровых скважин в случае дискретной минерализации месторождения. Наличие богатых и

бедных зон минерализации, весьма неравномерное распределение полезного ископаемого в пространстве, вызывает определенные трудности при выборе сети опробования, необходимой для точной оценки месторождения. Сгущение сети буровых скважин невыгодно с экономической точки зрения, и наоборот, разреженная сеть опробования даст заведомо неточную оценку запасов полезного минерала.

Для выбора оптимального размера сети буровых скважин на различных стадиях разведки месторождения при минимальных экономических затратах, но с достаточно высокой точностью оценки месторождения, возможно применение одного из методов имитационного моделирования *Cox point process*. Этот метод используется при проведении геостатистических исследований и оценке запасов месторождений с дискретным распределением минерализации. Пример одной из реализаций методом *Cox point process* приведен на Рис. 2.38. На рисунке представлена площадь 300х300м, на которой рассчитано вероятное распределение исследуемого признака для мелких блоков размером 1х1м.

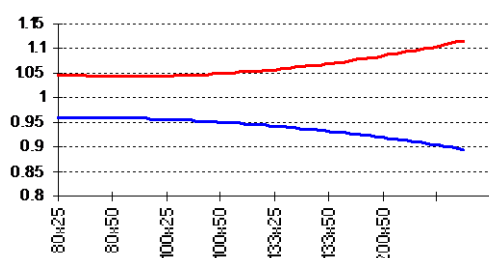
Определение оптимальных размеров сети геологического опробования для различных стадий освоения проводилось на примере одного из кимберлитовых месторождений Якутской алмазоносной провинции. В качестве исследуемого признака было принято количество кристаллов алмазов на 1м³. По содержанию данного признака кимберлитовое месторождение было разделено на два типа руды: богатые руды, бедные руды. Такое разделение нетрудно было сделать чисто геометрически, так как кимберлитовое тело имеет два рудных столба с качественно различным содержанием полезного компонента.

Все работы проводились для двух стадий освоения месторождения (доразведка и эксплуатационная разведка). Исследования отталкивались от существующих на месторождениях размеров сети бурения, с последующим их преобразованием от 20х20 до 50х200м.

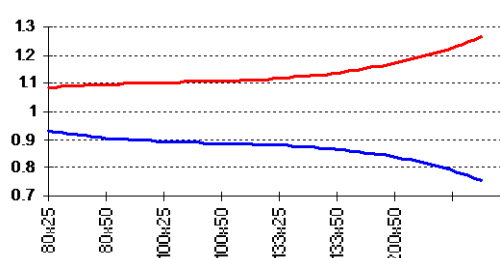
Геостатистические исследования исходных данных заключались в следующем. Во-первых, разделив исходную выборку на две, соответствующим различным типам руд, были построены гистограммы по каждому типу руды. Гистограммы создавались для определения закона распределения исследуемого признака. Отсутствие закона распределения говорит о недостоверности выборки и не дает право на применение любых геостатистических расчетов. Последующие работы заключались в приведении исходных данных к единому размеру (в нашем случае это соответствовало интервалу опробования равному 10-15 м), единому весу проб и, что не менее важно, для дальнейших работ использовались пробы скважин единого диаметра. После подобных преобразований исходных данных рассчитывались вариограммы с последующим подбором к ним моделей. На основании подобранных моделей определялись параметры вариограмм, такие как эффект самородков, порог, зона влияния пробы (ранг). Все эти работы проводились с использованием пакета программ *Datamine*[43, 45, 49].

133x25	200	36	2.261	0.898	1.104
133x50	200	18	2.217	0.853	1.15
200x50	200	12	2.272	0.842	1.168
Результаты расчетов для “богатых” руд (эксплоразведка)					
40x40	500	16	9.056	0.752	1.26
30x30	500	25	8.897	0.818	1.185
20x20	500	64	9.005	0.885	1.117
Результаты расчетов для “бедных” руд (эксплоразведка)					
40x40	500	16	2.272	0.536	1.554
30x30	500	25	2.213	0.624	1.446
20x20	500	64	2.239	0.747	1.267

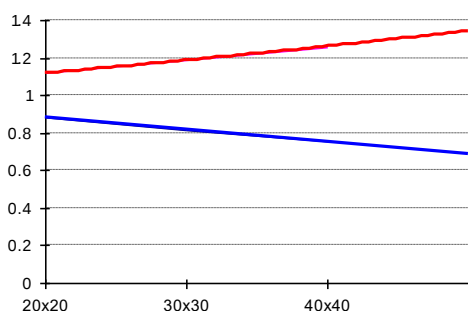
а



б



в



г

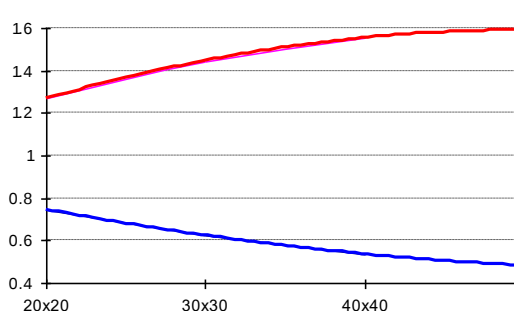


Рис. 2.39. Достоверность опробования в зависимости от выбора размеров сети буровых скважин на различных стадиях разведки месторождений (по оси X - размер сети опробования; по оси Y - значение отклонения к фактическому значению)

♦ доразведка: богатые руды (а); бедные руды (б)
эксплоразведка: богатые руды (в); бедные руды (г)

Таким образом, используя графики можно выбрать необходимую сеть опробования в зависимости от того, какая степень точности требуется на данном этапе. Например, для достоверной оценки запасов месторождения на этапе доразведки для богатых руд с вероятностью 0.95 достаточно использовать сеть буровых скважин 100x50м.

Особенностью метода является возможность его применения на месторождениях с дискретным распределением минерализации, где применение обычных методов моделирования обычно не дает достаточно достоверных результатов.

2.7.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ КОНТУРОВ РУДНЫХ ТЕЛ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК

Погрешность определения контуров рудного тела зависит от точности определения пространственного положения скважин и, в целом, насколько правильно

выбрана система (сеть) выработок для необходимой на данном этапе точности оценки геометрической переменной [64, 77, 57].

Точность определения пересечения (координат) горной выработки с рудным телом зависит от ряда факторов, к которым в основном можно отнести следующие:

- геодезический фактор
- геофизический
- технический
- технологический
- геологический
- неучтенные факторы.

Геодезический фактор заключается в основном в определении точности координат устья буровых скважин и имеет определенное значение ошибки, связанной с системой триангуляции, точностью применяемых геодезических приборов и т.д. Под геофизическим фактором подразумевается точность проведения инклинометрии. К техническим факторам относятся бурение погнутыми трубами, применение бурильных компоновок неправильных конструкций, неравномерная толщина стенок и т.п. Технологические факторы - это в основном способы и режимы бурения. Геологические факторы связаны с неоднородностью горных пород, трещиноватостью, тектоническими нарушениями и т.д. Таким образом, ошибка определения координат точки пересечения выработками контуров рудного тела в целом, состоит из ряда ошибок, сумма которых и будет являться в принципе критерием определения точности, поскольку практически сложно определить значение и степень влияния вышеперечисленных ошибок на конечный результат в определении погрешности контуров рудного тела, для подобных расчетов были приняты результаты подсечения скважин трубки Интернациональная.

Для определения координат скважин колонкового бурения тр. Интернациональная проводились расчеты возможного отклонения геологических скважин на горизонте –265м. Значения отклонений были определены –7.4м (пессимистическая оценка –до 10м) от существующих расчетных данных. Маркшейдерской службой были выявлены координаты стволов скважин и проведено сопоставление результатов их местоположения. Отклонения по расчетным и фактическим данным даёт Таблица 2.7.

Таблица 2.7. Фактическое отклонение координат скважин от расчетных

№ скважин	отклонение, м
1	8.68
2	5.8
3	4.81
4	4.19
5	8.25
6	9.71
7	7.52
8	5.15
9	5.65
10	7.38
11	13.89
среднее	8.13

Для определения возможной величины отклонения скважин колонкового бурения от расчетной (Рис. 2.40) для различных горизонтов, был построен график, где по оси Х отложена абсолютная отметка, а по оси Y – фактическая величина отклонения (в метрах).

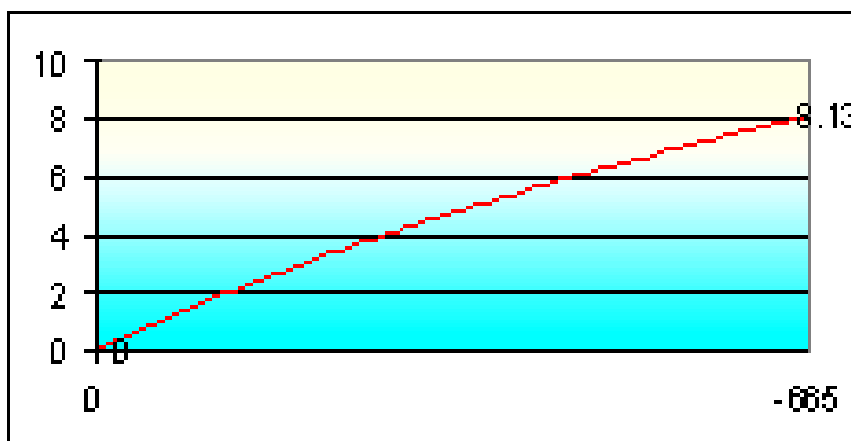


Рис. 2.40. Зависимость фактического отклонения от расчетного значения от глубины горной выработки.

График использовался для определения величины вероятного отклонения ствола скважин колонкового бурения от расчетного значения на определенном горизонте. Таким образом, координаты точки пересечения выбранного горизонта, с учетом влияния ошибки отклонения будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} x_i &= X \pm f(Z) \\ y_i &= Y \pm f(Z) \end{aligned} \quad (2.27)$$

где $f(Z)$ – функция отклонения фактических координат скважин от расчетных в зависимости от глубины.

Необходимо отметить, что величина отклонения может меняться в заданных пределах, но определить конкретное значение для каждой скважины практически невозможно. Однако есть возможность оценить степень изменчивости площади в зависимости от влияния ошибки отклонения и на основании проведенных расчетов сделать вывод о погрешности определения контура рудного тела. Методика последующих расчетов заключалась в следующем:

- по графику определялась величина коэффициента отклонения
- генерировалось достаточное количество случайных чисел в заданных пределах
- производился перерасчет координат скважин
- методом интерполяции определялся контур рудного тела
- определялась площадь рудного тела
- сравнение полученной площади с исходными данными

Практически при достаточно большом количестве проведенных расчетов есть возможность получить достаточно точную оценку погрешности геометрической переменной. Отсутствие необходимых программ накладывает определенные трудности при проведении подобных расчетов и ограничивает их количество. Тем не менее, полученные результаты позволяют оценить погрешности контуров рудного тела. Площади рудного тела определялись по трем параметрам: нижний, средний и верхний предел. Примеры результатов расчетов приведены ниже (Таблица 2.8), где P1 –нижний предел, P2 –средний, P3 –верхний предел.

Таблица 2.8. Результаты определения погрешности рудного тела

Площадь	Горизонт 1			Горизонт 2			Горизонт 3		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
S1	0.96	0.76	0.63						
S2	0.95	0.75	0.66	0.96	0.78	0.69	0.91	0.72	0.53

S3	0.95	0.76	0.61	0.94	0.8	0.66	0.92	0.65	0.51
S4	0.98	0.76	0.67	0.99	0.82	0.68	0.86	0.63	0.52
S5	0.96	0.76	0.65	0.99	0.84	0.67	0.93	0.67	0.5
S6	0.96	0.76	0.64	0.98	0.8	0.71	0.89	0.69	0.52
S7	0.94	0.76	0.65	0.99	0.82	0.67	0.86	0.64	0.53
S8	0.95	0.75	0.64	1	0.84	0.71	0.83	0.59	0.49
S9	0.96	0.78	0.68	0.97	0.83	0.69	0.86	0.61	0.5
S10	0.96	0.77	0.66	0.99	0.81	0.68	0.92	0.66	0.5
S11	0.99	0.78	0.65	1	0.82	0.69	0.89	0.66	0.5
S12	1	0.83	0.67	0.96	0.81	0.69	0.92	0.67	0.52
S13	-	-	-	0.99	0.81	0.68	0.89	0.63	0.48
S14	-	-	-	1	0.82	0.67	0.9	0.64	0.49
S15	-	-	-	0.98	0.87	0.68	0.87	0.63	0.5
S16	-	-	-	0.96	0.83	0.67	-	-	-
Среднее	0.96	0.77	0.65	0.98	0.82	0.68	0.89	0.65	0.51

Для определения величины погрешности геометрической переменной рудного тела в зависимости от выбранной сети буровых скважин были смоделированы контуры рудных тел на различных горизонтах с различной сетью опробования. Методика работ состояла из следующих этапов:

- -выбор сети буровых скважин;
- -создание регулярной сети с заданным шагом между устьями буровых скважин;
- - моделирование контуров рудного тела
- расчет площади построенной модели.

Таблица 2.9. Погрешность оконтуривания рудного тела в зависимости от размера сети буровых скважин.

Размер сети	Погрешность в %
10x10	1.9
20x20	5.2
20x40	7.4
40x40	9.2
40x80	13
80x80	16
100x100	23

По результатам таблицы был построен график, где по оси X отложены размеры сети горных выработок, а по оси Y – погрешность определения контуров рудного тела при выбранной сети.

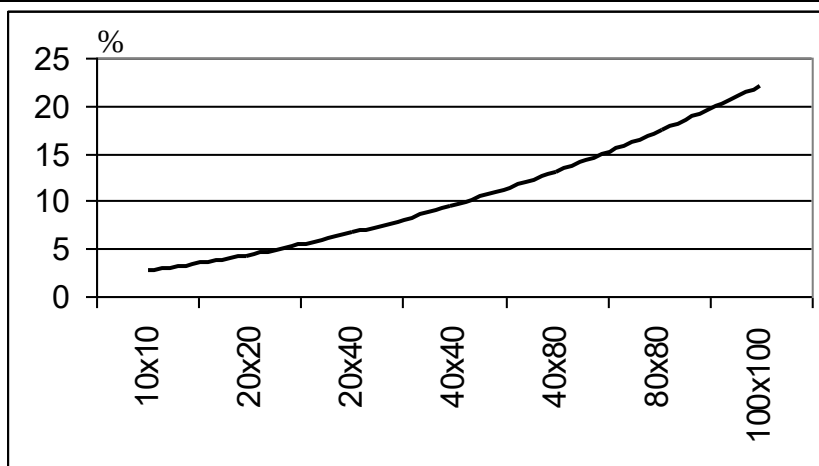


Рис. 2.41. Определение величины погрешности рудного тела в зависимости от размера сети наблюдений.

Таким образом, используя приведенные расчеты, можно определить общую погрешность оценки площади, как для каждого горизонта, так и объема рудного тела в целом.

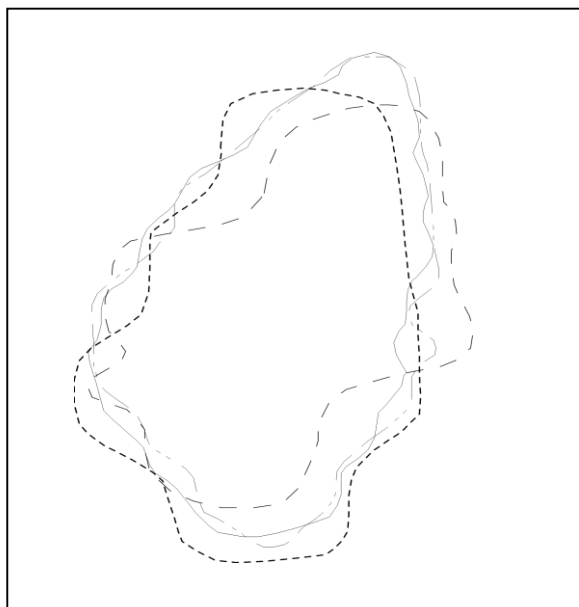


Рис. 2.42. Пример определения контуров рудного тела для горизонта 100м при различных реализациях сети наблюдений

2.7.2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНТУРОВ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ

Как известно, формы кимберлитовых тел весьма разнообразны, но их особенностью, по сравнению с месторождениями многих других полезных ископаемых, являются четкие геологические границы, обусловленные областью распространения алмазоносных пород кимберлитового состава.

В основе информации, которой располагает разведчик при решении задач оконтуривания разведочных горизонтов, интерполяции и экстраполяции геологических границ, лежат геологические знания, базирующиеся на априорной информации и квалификации геолога, и формализованные данные разведочного бурения (Рис. 2.43).

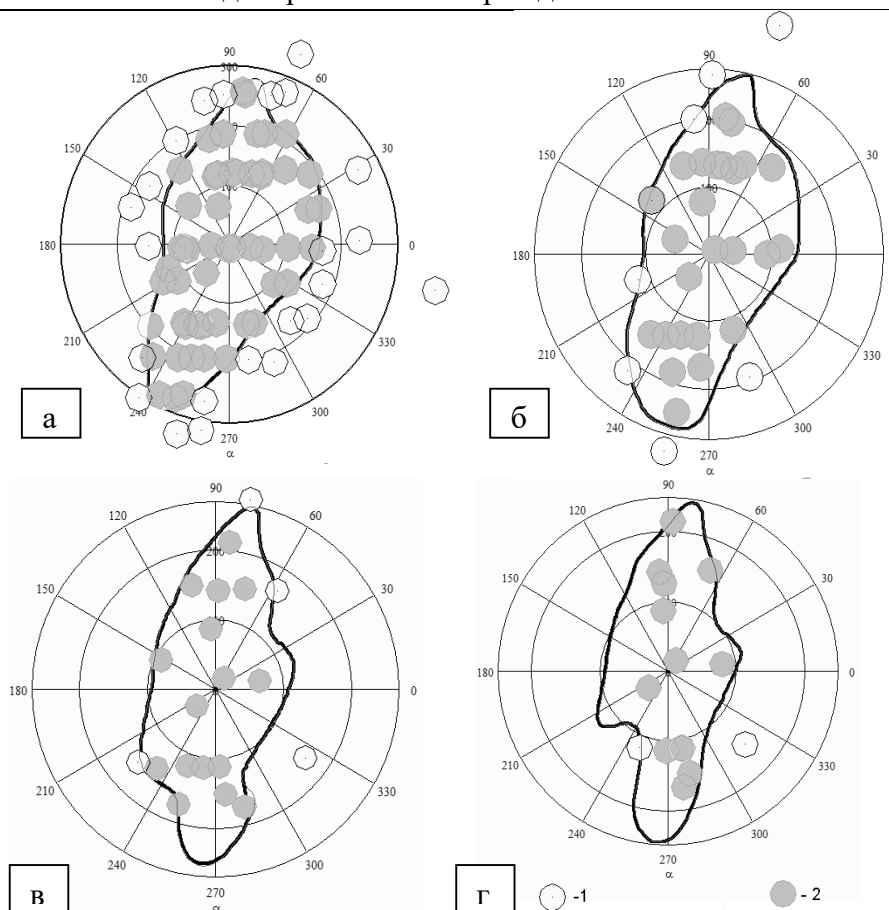


Рис. 2.43. Контуры кимберлитового тела на разведочных горизонтах 190 (а), 100 (б), 10(в), -55 м (г) с точками «пустых» (1) и «продуктивных» (2) скважин.

Можно, конечно, было бы предложить и другие варианты отрисовки контуров, но, очевидно, что помимо чисто геологических соображений разнообразие этих вариантов зависит от числа и плотности сети разведочных скважин и взаимного положения этих горизонтов. Кроме того, очевидно также, что анизотропия изменчивости контуров: в диапазонах углов 60° - 90° и 240° - 270° (Рис. 2.43, а,б), а также 10° - 50° и 220° - 250° (Рис. 2.43, в, г) изменчивость контуров значительно выше, чем в ряде других направлений. Очевидно также, что в форме этих контуров наблюдается определенная унаследованность.

Задача состоит в формализации данных и получении некоторых количественных критериев для прогноза контуров на основе имеющейся информации. Существование зависимости формы контура рудного тела от угла его рассмотрения в плоскости некоторого горизонта, а также наличие «унаследованности» форм контуров и некоторой априорной информации позволяет сформировать некоторую систему признаков, характеризующих форму изучаемого объекта. Отметим сразу, что разрабатываемая методика ориентирована на изучение и прогнозирование *связных* контуров. В случае более сложной топологии данный подход предусматривает работу с каждым отдельным контуром (Рис. 2.44).

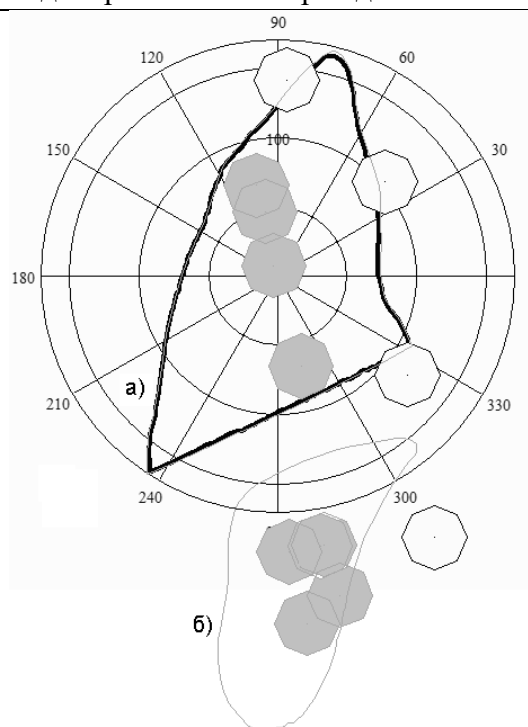


Рис. 2.44. Распадение контура кимберлитового тела на два контура (а) и (б) на горизонте -80 м.

В данном случае целесообразно рассматривать, в одном случае, например, контур на горизонте -55 м и контур «северного» тела на горизонте -80 м (Рис. 2.44, а), а во втором, - контур на горизонте -55 м и контур «южного» тела на горизонте -80 м (Рис. 2.44, б).

Логично предположить, что местоположение границы рудного тела, например, на горизонте 10 м в точке, определяемой радиусом при угле 60° (Рис. 2.43, в) должно зависеть не только от местоположения контура на вышележащих горизонтах в этой же вертикальной плоскости, секущей рудное тело при угле 60° , но также зависит от изменчивости контура в секторе, вырезающим определенную часть рудного тела. В общем случае проще всего рассматривать весь контур рудного тела на вышележащем (вышележащих) горизонте, т.е. в секторе от 0° до 360° .

Также рассматривая отмеченную выше зависимость изменчивости контуров от направления (угла), очевидно следует учитывать в системе признаков также и характеристики этих направлений – углы.

Таким образом, если привязаться к полярной системе координат, то целесообразно рассматривать в качестве прогнозируемой переменной u значение радиуса при определенном угле - $r(\alpha)$, а в качестве входных переменных x – значения углов β с определенным шагом дискретизации $\Delta\beta$ и радиусов $r(\beta)$ на вышележащих горизонтах – одном или нескольких. Отметим, что в случае решения задачи интерполяции входные переменные должны характеризовать выше- и нижележащие горизонты.

Формально исходные данные формируются в виде таблицы, включающей эталонные точки – Y и входные переменные X , представленные несколькими блоками: углов - X_β ; радиусов на горизонте H_1 – X_1 , H_2 - X_2 (Таблица 2.10).

Таблица 2.10. Исходные данные для решения задачи прогноза контуров

α	Y	X_β , град				X_1 (горизонт H_1)				X_2 (горизонт H_2)			
	$r(\alpha)$	1	2	...	m	1	2	...	m	1	2	...	m

α_1	$r(\alpha_1)$	β_1	β_2	...	β_m	$r(\beta_1)$	$r(\beta_2)$	...	$r(\beta_m)$	$r(\beta_1)$	$r(\beta_2)$	...	$r(\beta_m)$
α_2	$r(\alpha_2)$	β_2	β_3	...	β_1	$r(\beta_2)$	$r(\beta_3)$	...	$r(\beta_1)$	$r(\beta_2)$	$r(\beta_3)$	...	$r(\beta_1)$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Количество блоков $X_1, X_2 \dots$ зависит от числа используемых для прогноза горизонтов. Шаг дискретизации по углу для переменных X_β и $X_1, X_2 \dots$ $\Delta\beta$ целесообразно принять таким же как при дискретизации выходной переменной Y по углу α .

Необходимо подчеркнуть, что строки Таблица 2.10 включают данные по интервалам, которые по результатам экспертной оценки могут быть включены в качестве опорных как для выходной, так и для входных переменных. Например, если рассматривать в качестве выходной переменной контур на горизонте 100 м, а входной - контур на горизонте 190 м (Рис. 2.43, а,б), то по расположению и густоте точек пресечения кимберлитового тела для выходной переменной целесообразно исключить секторы $20^\circ - 40^\circ, 60^\circ - 70^\circ, 260^\circ - 280^\circ, 310^\circ - 350^\circ$. Для входной переменной меньшая плотность точек в секторах $40^\circ - 60^\circ$ и $190^\circ - 220^\circ$.

Предложенный принцип описания системой признаков контуров рудного тела, позволяет рассчитать статистические характеристики выборки, представленной в таблице: оценки математического ожидания и ковариационных матриц входных и выходной переменных, что позволяет сформировать оптимальный фильтр, используя подходы, известные в математической статистике (Кендалл, Стьюарт, 1976) и теории калмановской фильтрации (Верлань, Сизиков, 1986), что позволяет количественно учитывать априорную информацию.

Линейный фильтр

$$A = C_{YX} \cdot C_X^{-1}, \quad (2.28)$$

где C_X - ковариационная матрица входных переменных, C_{YX} - матрица взаимных ковариаций выходной и входных переменных.

Прогнозное значение на выходе линейного фильтра

$$Y_p = \mu_Y + A(X - \mu_X), \quad (2.29)$$

где μ_Y - оценка априорного математического ожидания выходной переменной (прогнозируемого контура); μ_X - оценка вектора математического ожидания входных переменных; X - составной вектор, включающий углы дискретизации и значения радиусов контуров, используемых для прогноза.

При вычислительной реализации этого алгоритма была учтена различная размерность переменных в блоках (Таблица 2.10): углы и радиусы переводились в безразмерные стандартизованные величины путем центрирования по оценкам их средних значений и нормирования по оценкам стандартных отклонений.

Второй важной проблемой является вырожденный характер ковариационных матриц (ранг ковариационной матрицы существенно меньше ее размерности), получающихся в результате статистической обработки данных и объясняющийся тем, что в общем случае количество строк данных (Таблица 2.10) может быть существенно меньше количества входных переменных. Кроме того, существование сильных автокорреляций также усиливает проблему плохой обусловленности ковариационной матрицы C_X и делает невозможным обычную процедуру обращения этой матрицы. Для решения этой проблемы нами был использован алгоритм вычисления псевдообратной

матрицы, основанный на результатах ее сингулярного разложения (Форсайт, Малькольм, Моулер, 1980; Вахромеев, Давыденко, 1987, [18]).

2.7.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Апробация предложенного алгоритма была реализована в программной среде MathCad и включала реализацию следующих основных процедур:

1. Автоматическая дискретизация контуров на рассматриваемых горизонтах в полярной системе координат.
2. Программная реализация и отладка комплекса программ, реализующих вычисление фильтра на основе статистических процедур и сингулярного обращения матриц.
3. Программная реализация и отладка комплекса программ, позволяющих решать задачи интерполяции и экстраполяции.
4. Проведение вычислительного эксперимента на представленном материале.

Процедура дискретизации позволяет получить значения углов (Рис. 2.45) и радиусов (Рис. 2.46), а также оценки средних, стандартных отклонений и фильтра.

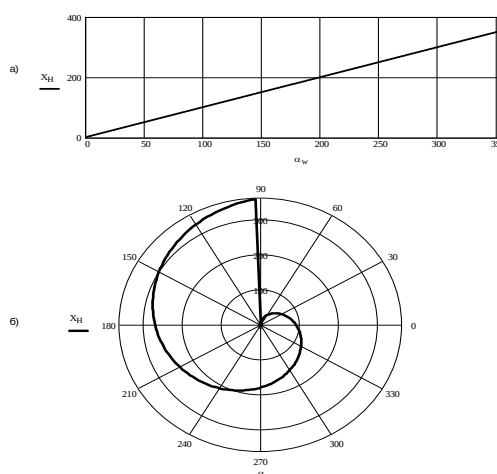


Рис. 2.45. Пример графического изображения значений углов при шаге дискретизации 2° : а – развертка; б – изображение в полярной системе координат.

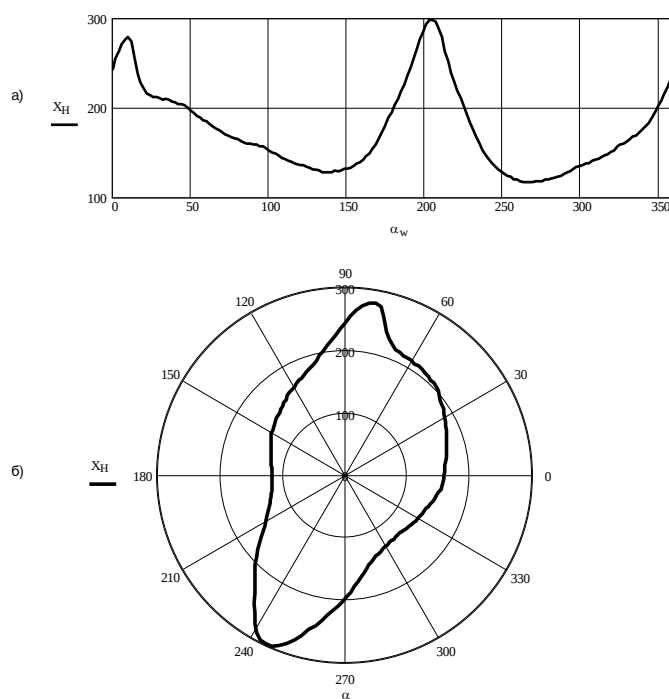


Рис. 2.46. Пример результата дискретизации контура рудного тела на горизонте 190 м при шаге дискретизации 2° : а – развертка; б – изображение в полярной системе координат.

Результаты расчета средних (“E”), стандартных отклонений (“St”) и весовой функции фильтра при шаге дискретизации по углу 10° для блока вектора входной переменной, представленного углами лучей (для прогноза контуров кимберлитовой трубки на горизонте 100 м по контуру на горизонте 190 м), дает Таблица 2.11.

Таблица 2.11. Расчет параметров прогнозирования для шага дискретизации 10°

$Y_{\text{progn}} = "H_progn=100"$		$X_{\text{variable}} = "Alpha"$		$\Delta\alpha = 10$	
	0	1	2	3	
0	"Alpha"	"E"	"St"	"wFiltr"	
1	0	244.879	279.469	-0.045	
2	10.286	241.319	273.379	0.016	
3	20.571	237.758	266.959	-0.009	
4	30.857	234.198	260.183	-0.017	
5	41.143	230.637	253.023	-0.023	
6	51.429	227.077	245.446	-0.031	
7	61.714	223.516	237.412	-0.034	
8	72	219.956	228.872	-0.019	
9	82.286	216.396	219.768	-0.013	
10	92.571	212.835	210.026	-0.005	
11	102.857	209.275	199.552	-0.009	
12	113.143	205.714	188.226	0.023	
13	123.429	202.154	175.881	0.051	
14	133.714	198.593	162.287	-0.029	
15	144	195.033	147.096	0.077	
16	154.286	191.473	129.749	0.119	
$\alpha_{\text{мс w}} =$ 17	164.571	187.912	109.225	-0.113	
18	174.857	198.198	109.225	-0.113	
19	185.143	208.484	109.225	-0.113	
20	195.429	204.923	133.728	0.072	
21	205.714	201.363	154.057	0.037	
22	216	197.802	171.702	0.024	
23	226.286	208.088	171.702	0.024	
24	236.571	218.374	171.702	0.024	
25	246.857	228.659	171.702	0.024	
26	257.143	238.945	171.702	0.024	
27	267.429	235.385	190.557	0.025	
28	277.714	231.824	207.46	0.009	
29	288	228.264	222.856	0.006	
30	298.286	238.549	222.856	0.006	
31	308.571	248.835	222.856	0.006	
32	318.857	245.275	238.286	-0.124	
33	329.143	241.714	252.572	0.128	
34	339.429	252	252.572	0.128	
35	349.714	248.44	266.457	-0.148	

При испытании алгоритма учитывалось реальное расположение скважин на разведочных горизонтах. В качестве опорных были приняты наиболее изученные горизонты 190 и 100м (Рис. 2.47) расчеты проведены при шаге дискретизации по углу 5° (Рис. 2.48 – Рис. 2.50) и 2° (Рис. 2.51 – Рис. 2.53). При этом из рассмотрения исключались перечисленные выше «малонадежные секторы» выходного и входных контуров (Рис. 2.50, Рис. 2.53).

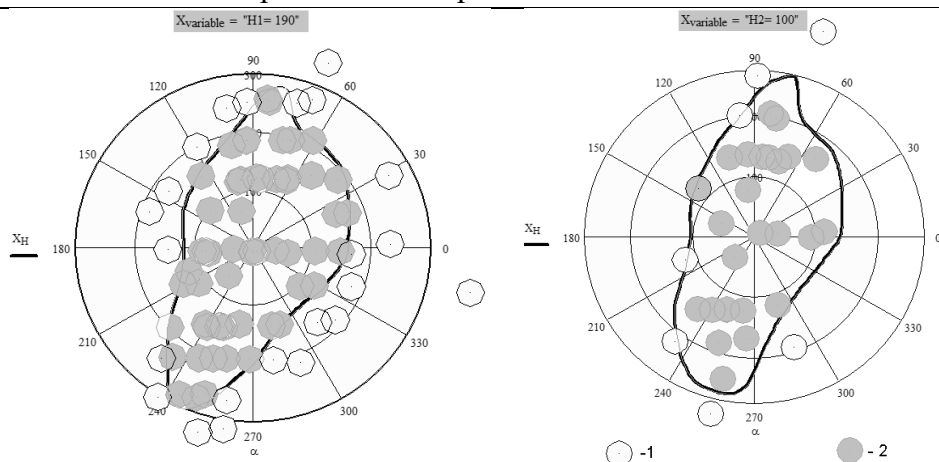


Рис. 2.47. Контуры кимберлитовых трубок на горизонтах 190 и 100м: 1 – «пустые» скважины; 2 - точки подсекания скважинами кимберлитов.

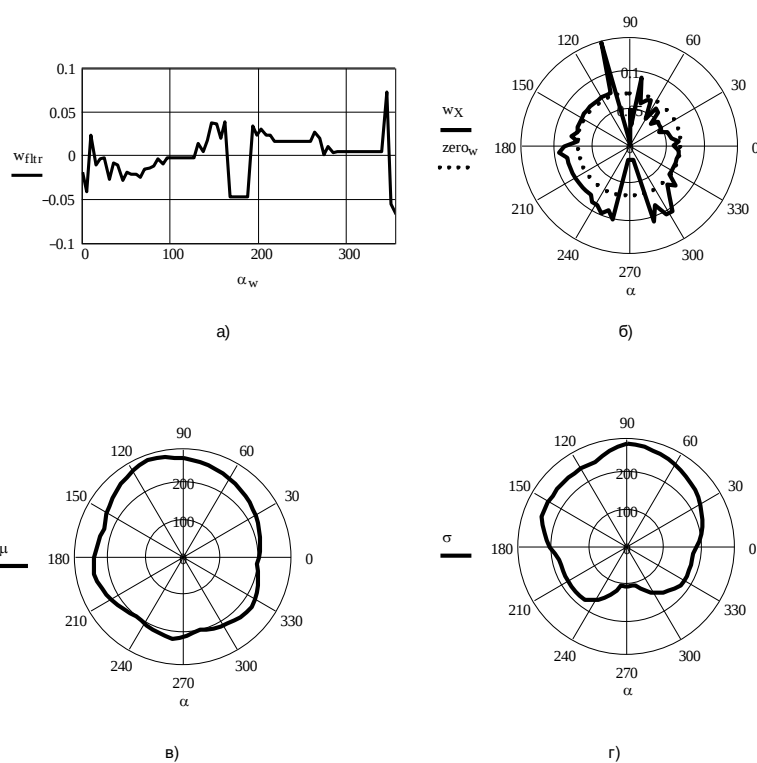


Рис. 2.48. Параметры фильтра (для блока углов лучей) для прогноза контура кимберлитовой трубки на горизонте 100 м по контуру на горизонте 190 м при шаге дискретизации по углу 5° : а – развертка весовой функции фильтра; б – весовая функция (wX) в полярной системе координат (значения весовой функции меньше $zero_w$ – отрицательные); в и г – соответственно статистические оценки средних значений и стандартных отклонений.

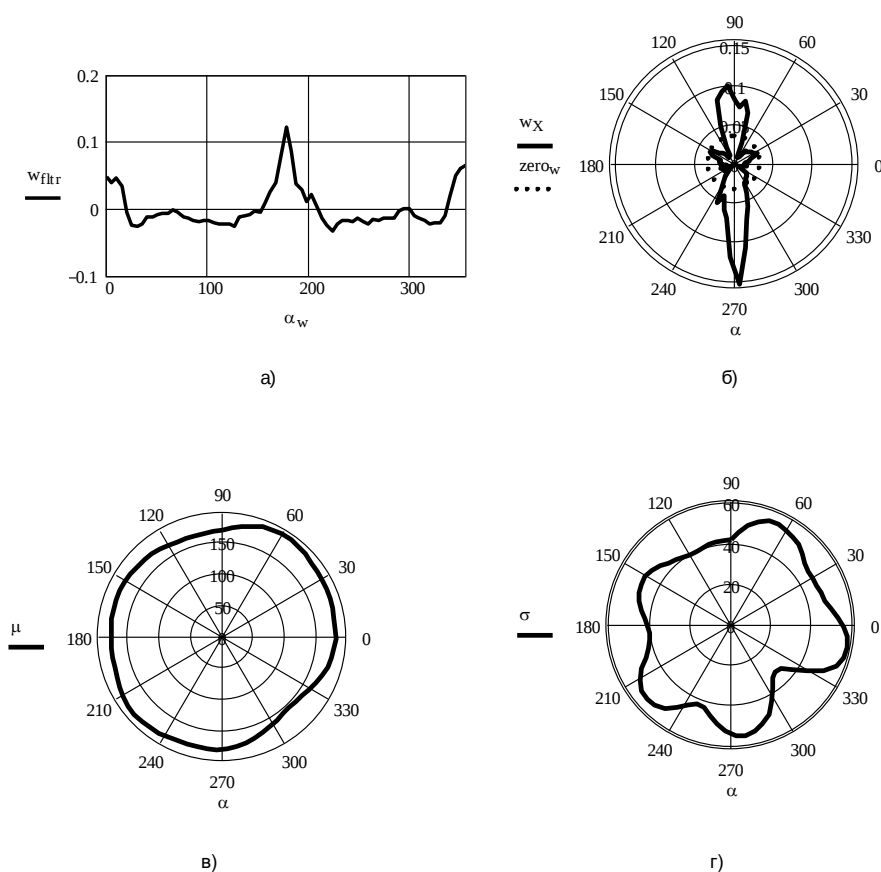


Рис. 2.49. Параметры фильтра (для блока радиусов контура на горизонте 190м) для прогноза контура трубки на горизонте 100м по контуру на горизонте 190м при шаге дискретизации по углу 5° : а – развертка весовой функции фильтра; б – весовая функция (w_X) в полярной системе координат (значения весовой функции меньше $zero_w$ – отрицательные); в и г – соответственно статистические оценки средних значений и стандартных отклонений.

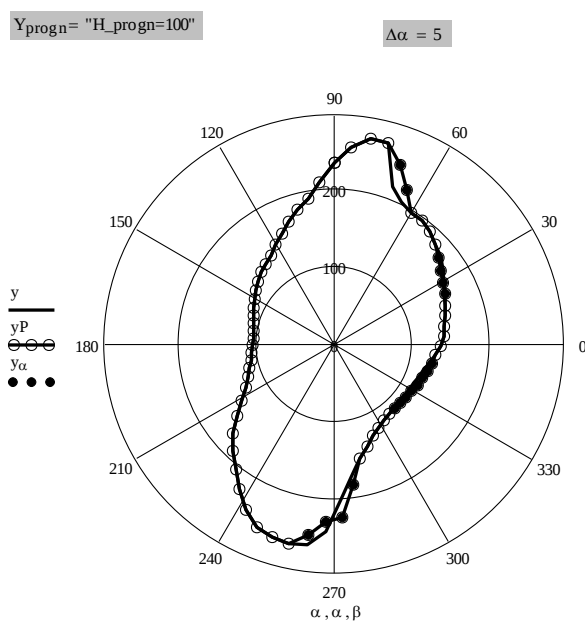


Рис. 2.50. Прогноз контура трубки на горизонте 100м по контуру на горизонте 190м при шаге дискретизации по углу 5° : y – исходный контур на горизонте 100м; yP – контур по результатам прогноза; y α – прогноз в секторах с исключением значений радиусов при расчете параметров фильтра.

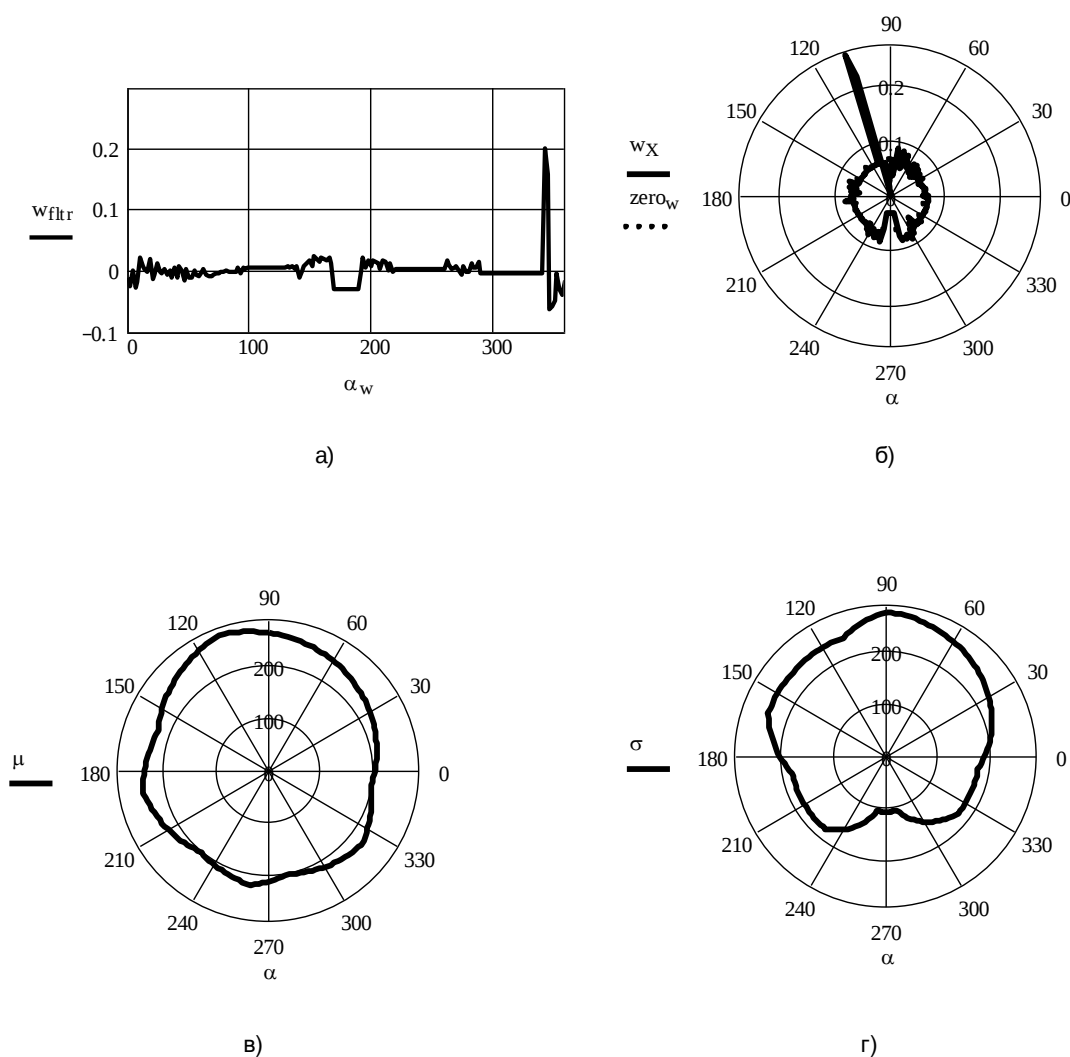


Рис. 2.51. Параметры фильтра (для блока углов лучей) для прогноза контура кимберлитовой трубки на горизонте 100м по контуру на горизонте 190м при шаге дискретизации по углу 2° : а – развертка весовой функции фильтра; б – весовая функция (w_X) в полярной системе координат (значения весовой функции меньше $zero_w$ – отрицательные); в и г – соответственно статистические оценки средних значений и стандартных отклонений.

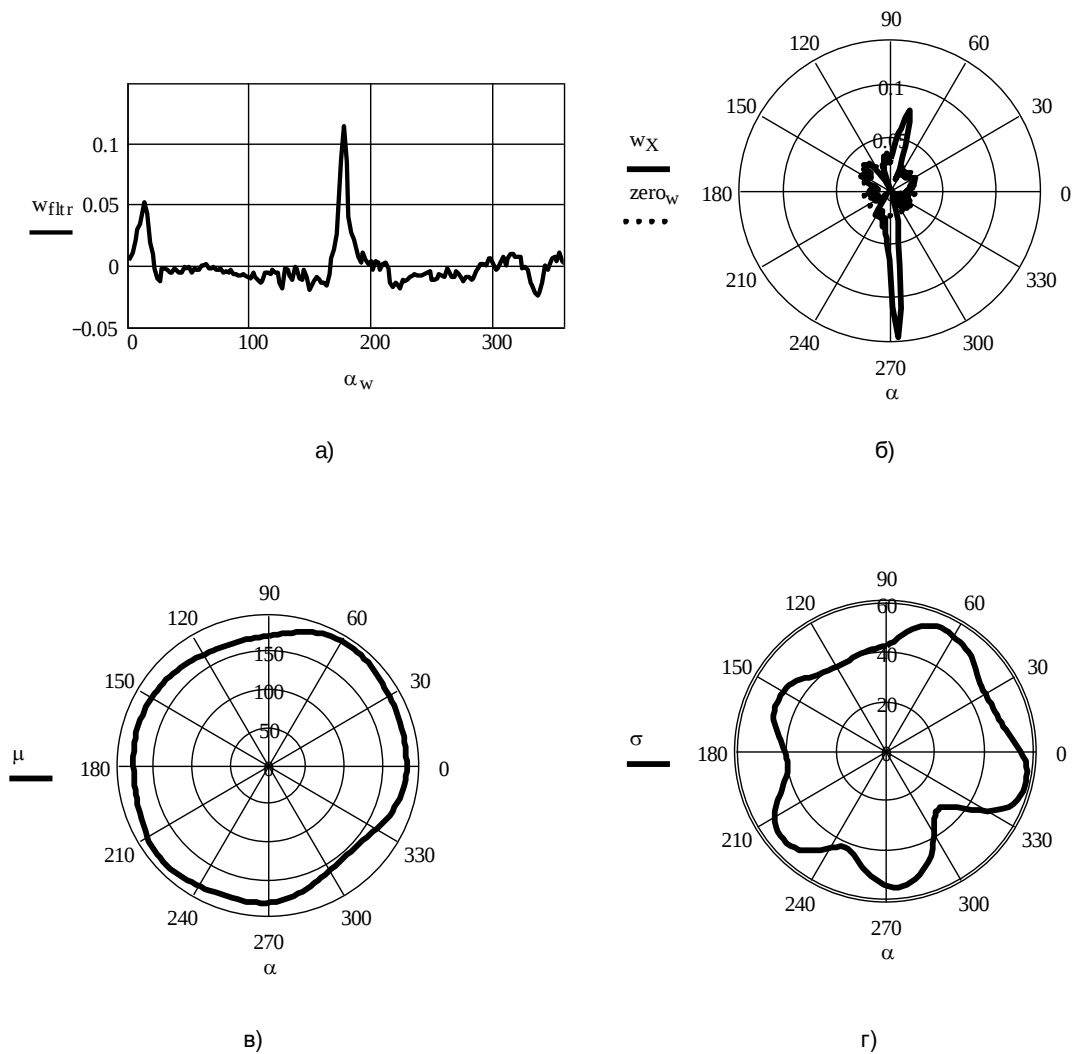


Рис. 2.52. Параметры фильтра (для блока радиусов контура на горизонте 190м) для прогноза контура кимберлитовой трубки на горизонте 100м по контуру на горизонте 190м при шаге дискретизации по углу 2° : а – развертка весовой функции фильтра; б – весовая функция (w_X) в полярной системе координат (значения весовой функции меньше zero_w – отрицательные); в и г – соответственно статистические оценки средних значений и стандартных отклонений.

$Y_{\text{progn}} = "H_{\text{progn}}=100"$ $\Delta\alpha = 2$

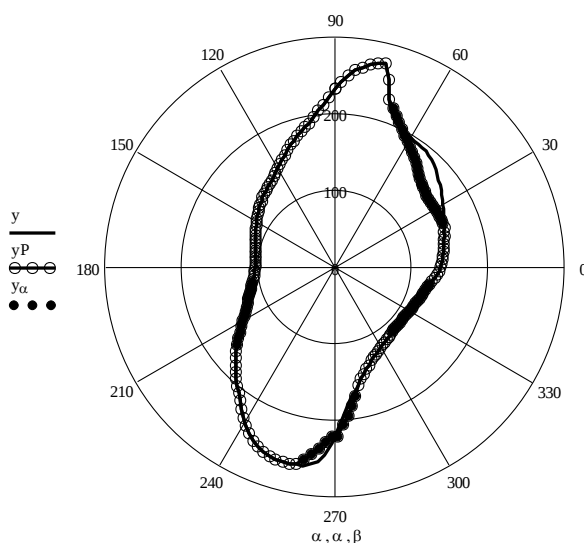
$$\text{sect}_{\alpha} = \begin{pmatrix} 60 & 70 \\ 20 & 40 \\ 310 & 350 \\ 260 & 280 \\ 40 & 60 \\ 190 & 220 \end{pmatrix}$$


Рис. 2.53. Результаты прогноза контура кимберлитовой трубки на горизонте 100м по контуру на горизонте 190м при шаге дискретизации по углу 2° : y – исходный контур на горизонте 100м; yP – контур по результатам прогноза; $y\alpha$ – прогнозные значения в секторах, из которых были исключены значения радиусов при расчете параметров фильтра.

Сравнение результатов экстраполяции с шагом дискретизации углу 2° (Рис. 2.50) и углу 5° (Рис. 2.53) показывают хорошую сходимость данных интерполяции с отрисованным контуром. Существенное расхождение наблюдается только в наиболее изменчивом секторе 30° - 60° , в котором наименее надежные данные как по выходному контуру, так и по горизонту 190м.

С использованием аналогичных параметров и тех же самых исключаемых секторов, проведена экстраполяция контура на горизонт 10м (Рис. 2.54) по данным контуров на горизонтах 100 и 190м

$$Y_{\text{progn}} = "H_{\text{progn}} = 10"$$

$$\Delta\alpha = 5$$

$$\text{sect}_{\alpha} = \begin{pmatrix} 60 & 70 \\ 20 & 40 \\ 310 & 350 \\ 260 & 280 \\ 40 & 60 \\ 190 & 220 \end{pmatrix}$$

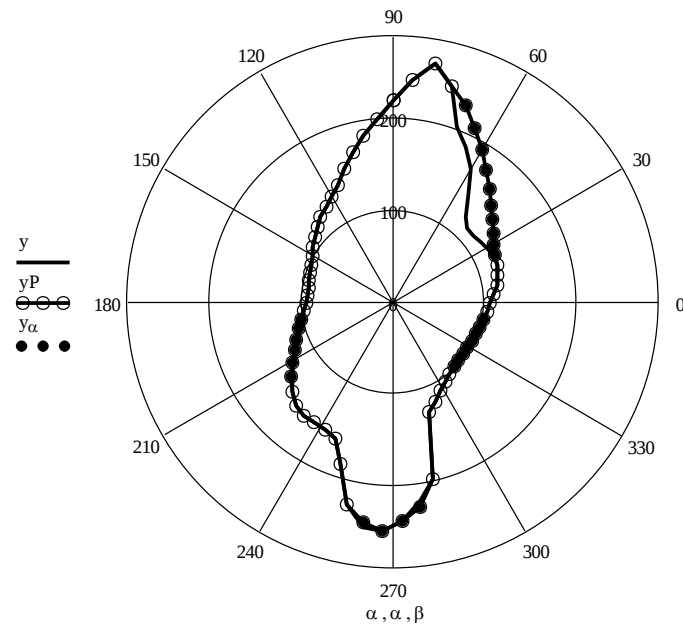


Рис. 2.54. Прогноз контура трубки на горизонте 10м по контурам на горизонтах 100 м и 190м при шаге дискретизации по углу 5° : y – исходный контур на горизонте 100м; yP – контур по результатам прогноза; y_{α} – прогнозные значения в секторах с исключением значений радиусов при расчете параметров фильтра.

$Y_{\text{progn}} = "H_{\text{progn}} = 10"$ $\Delta\alpha = 2$

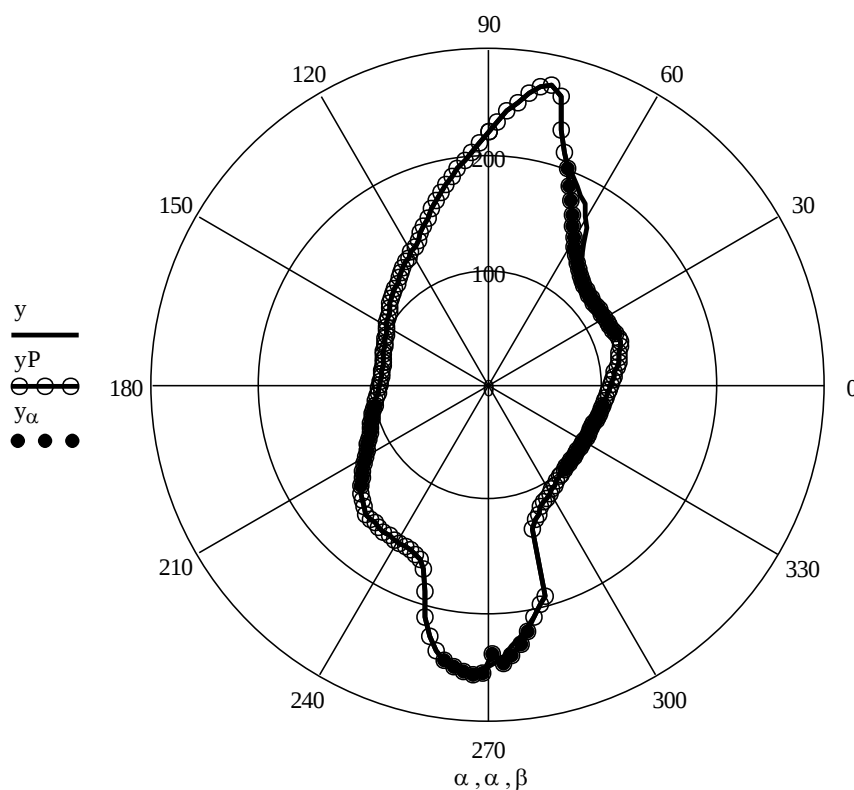
$$\text{sect_}\alpha = \begin{pmatrix} 60 & 70 \\ 20 & 40 \\ 310 & 350 \\ 260 & 280 \\ 40 & 60 \\ 190 & 220 \end{pmatrix}$$


Рис. 2.55. Результаты прогноза контура кимберлитовой трубки на горизонте 10м по контурам на горизонтах 100м и 190м при шаге дискретизации по углу 2° : y – исходный контур на горизонте 100м; yP – контур по результатам прогноза; y_α – прогнозные значения в секторах, из которых были исключены значения радиусов при расчете параметров фильтра

Сравнение Рис. 2.54 и Рис. 2.55 приводит к выводу об эффективности предложенного алгоритма и возможности его использования для решения задач экстраполяции контуров на более глубокие горизонты. Более того, предложенный алгоритм позволяет также проводить интерполяцию контура на одном и том же горизонте для участков, характеризующихся относительно малой надежностью отрисовки контуров.

Необходимо подчеркнуть, что реализованные процедуры интерполяции и экстраполяции учитывают априорную информацию, заложенную в исходном варианте интерполируемого или экстраполируемого контура. В результате оптимальной фильтрации получается апостериорная модель обрабатываемого контура.

Результаты прогноза контура на горизонте -80 м (Рис. 2.55) с учетом данных на четырех вышележащих горизонтах показывают, что предложенный алгоритм достаточно устойчив и позволяет получить контуры, не противоречащие данным бурения

Основные элементы методики прогноза контуров рудных тел

Теоретическое обоснование, разработка и реализация алгоритма прогноза контуров кимберлитовых тел, а также результаты вычислительного эксперимента позволяют сформулировать основные элементы предлагаемой методики, необходимой составляющей которой является использование разработанного математического обеспечения. Разработанные алгоритмы могут быть также реализованы в других программных продуктах, что требует соответствующей работы по программированию.

1. Анализ данных бурения по горизонтам и классификация сегментов контуров на безусловно надежные и малонадежные.
2. Оцифровка контуров в полярной системе координат с относительно небольшим шагом дискретизации 2° - 5° в зависимости от степени изученности горизонта.
3. Уточнение контура на наиболее изученном горизонте на основе интерполяции с помощью разработанного алгоритма, что требует построения априорного контура по результатам экспертной оценки специалиста.
4. Экспертная оценка полученного в результате интерполяции контура и его корректировка в случае необходимости.
5. Построение априорной модели контура на следующем горизонте с выделением малонадежных сегментов и прогноз с использованием алгоритма.
6. Повторение указанных выше процедур для нижележащих горизонтов.
7. Пересчет контуров по мере поступления новой информации по данным разведки и эксплуатации месторождения.

Проведенная разработка алгоритма и методики прогнозирования контуров рудного тела на разведочных горизонтах позволяет повысить эффективность операций интерполяции и экстраполяции контуров за счет задания их априорных моделей и оценки надежности проведения тех или иных сегментов контуров на изучаемом или вышележащих горизонтах.

Эффективность достигается за счет использования оптимальных фильтров Калмана, позволяющих получать регуляризированные решения некорректных задач, благодаря сужению коридора возможных решений на основе привлечения априорной информации. реализация подобной процедуры стала возможной за счет использования алгоритма вычисления псевдообратной матрицы на основе ее сингулярного разложения.

Развитие предложенного способа и методики прогнозирования целесообразно в нескольких направлениях:

- создание технологичной процедуры прогнозирования за счет интеграции с программными продуктами, используемыми при решении задач по подсчету запасов и проектировании;
- развитие автоматизированной методики построения априорных моделей контуров с учетом данных бурения и изучения геолого-геофизическими методами, изучения факторов, влияющих на особенности изменчивости контуров рудных тел на различных глубинах;
- более широкая апробация и адаптация разработанного способа и методики на отработанных или отрабатываемых месторождениях, а также способами имитационного моделирования.

2.7.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В практике моделирования месторождений применяются четыре метода оценки достоверности: сравнительный, статистический, аналитический, геологический.

Для статистического метода теоретическая база достаточно обоснована, поэтому его применение считается вполне надежным. Однако область применения статистического метода ограничена из-за несоответствия признаков геологических явлений признакам статистической совокупности. Но и при отсутствии указанного несоответствия не всегда можно преодолеть сложности фактических распределений вариантов, в результате чего допускаются ошибки при их аппроксимации. Численные значения ошибок оцениваются суждением.

Сущность аналитического метода заключается в разработке математического обоснования анализируемого геологического явления и использовании полученных теоретических положений для оценки достоверности его параметров. Так, достоверность вывода средних зависит от характера распределения вариантов совокупности. При ее оценке устанавливается тип статистического распределения, производится выбор соответствующего ему способа определений математического ожидания и вычисления доверительных границ этой статистики.

Геологический метод основан на тщательном изучении геологической обстановки, анализе и оценке достоверности методики получения геологической информации. Для большинства частных методик подобная оценка относительна.

При использовании сравнительного метода результаты предыдущего этапа изучения месторождения сопоставляются с последующими, считающимися более достоверными. Одним из видов этого метода является разрежение разведочной сети, при котором параметры (запасы, мощности, содержания), полученные по данным наиболее густой сети разведочных пересечений, принимаются за эталонные. К недостаткам метода относятся: принимаемая априори степень достоверности эталонного результата. Заранее считается, что он является самым точным и достоверным. Однако это далеко не так: зачастую запасы высоких категорий менее достоверны, чем запасы низких. Иногда за эталон принимаются данные, полученные в результате эксплуатации месторождения, в ходе которой допускаются крупные ошибки и неточности, слабо разработанная методика сравнения.

В случае моделирования геологического объекта точность и надежность созданной модели зависит как от качества и достоверности исходной информации, так и от параметров и методов математического анализа. В общем, оценка точности созданной модели состоит из нескольких этапов:

- геостатистический анализ распределения содержаний алмазов;
- перекрестная проверка исходных и моделируемых значений содержания алмазов;
- выбор метода и параметров моделирования кимберлитового месторождения;
- оценка надежности модели.

Определение надежности моделирования приведена на примере расчета распределения объемного веса в пределах кимберлитового рудного тела. В расчете участвовало 433 пробы 49 скважин. Гистограмма данных опробования приведена на Рис. 2.56.

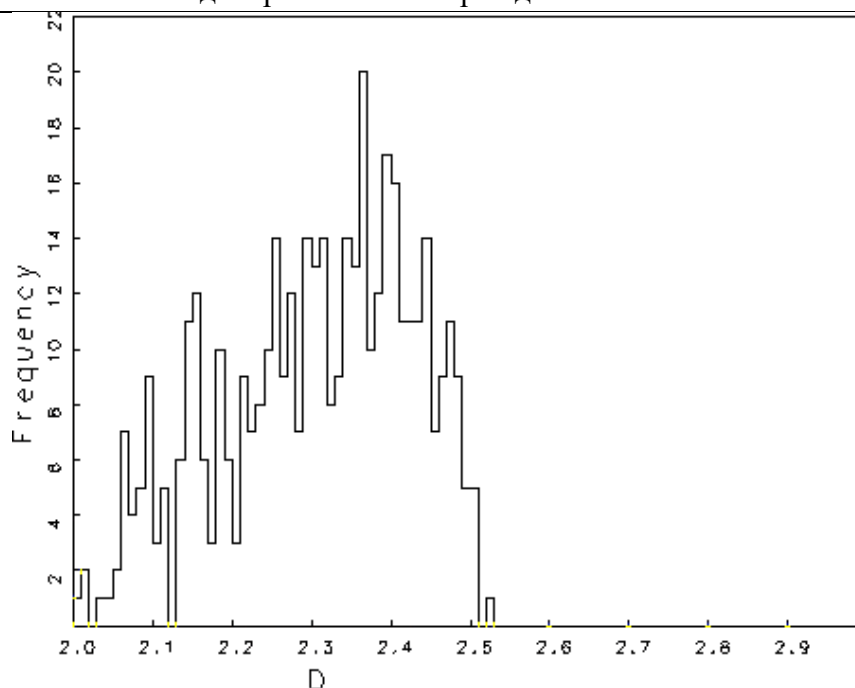


Рис. 2.56. Гистограмма объемных весов проб рудного тела

По данным распределения объемного веса была построена вариограмма и подобрана модель вариограммы (Рис. 2.57).

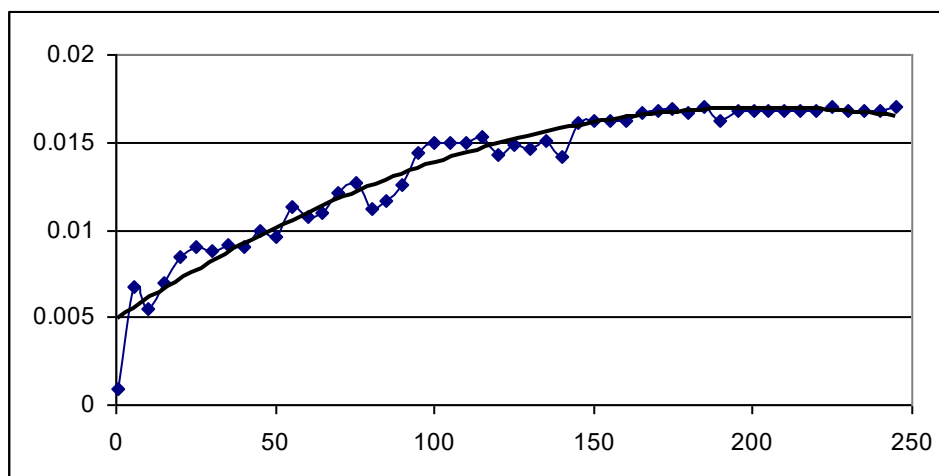


Рис. 2.57. Вариограмма и модель вариограммы по объемному весу

Единственное, что известно о месторождении (исследуемом объеме) – это содержание в пробах, поэтому наиболее качественной проверкой будет воспроизведение фактических данных, используя полученную вариограммную модель. При этом из массива данных исключается известная точка опробования, а затем производится оценка содержания в этой точке по соседним пробам и модели вариограммы. Сравнение фактического и оцененного содержания дает значение ошибки, а в целом по всему массиву – распределение таких ошибок и их среднее значение. Таким образом, по критерию минимальной ошибки существует возможность определить соответствие вариограммной модели в области последующего моделирования месторождения. В

результате перекрестной проверки для исследуемой модели получают следующие данные:

- оценку содержания в пробе;
- дисперсия кригинга для этой оценки;
- число проб, по которым сделана эта оценка.

Используя корреляционный анализ, существует возможность произвести оценку полученных данных, то есть определить коэффициент корреляции, который будет являться одним из основных показателей качества вариограммы. В представленном случае коэффициент корреляции составляет 0.85. На Рис. 2.58 представлены данные значений перекрестной проверки.

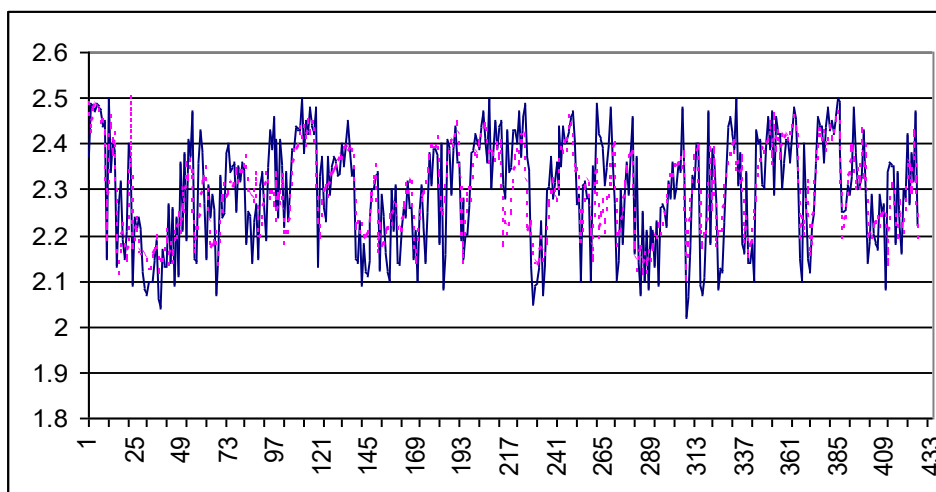


Рис. 2.58. Исходные и рассчитанные по данным модели вариограммы значения объемного веса

Очень важным показателем является также количество точек, участвующих в расчете элементарной ячейки блочной модели месторождения. На Рис. 2.59 представлены данные дисперсии кригинговой оценки в зависимости от количества точек, участвующих в расчете.

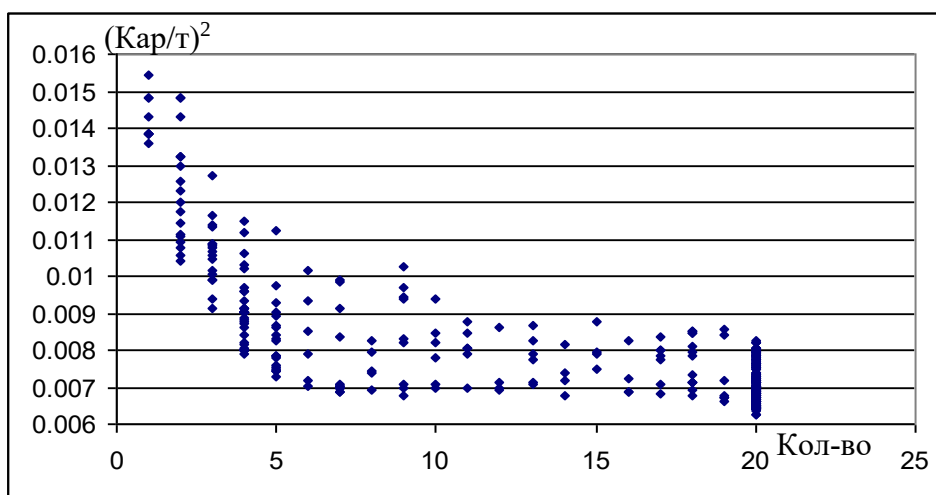


Рис. 2.59. Дисперсия оценивания блока методом кригинга в зависимости от количества точек, принимающих участие в расчете

Как видно из представленного рисунка, дисперсия оценки имеет тенденцию к снижению при увеличении количества точек. Возникает закономерный вопрос – какое

количество точек достаточно для проведения надежной оценки элементарного блока модели? Для решения данной задачи проводилось моделирование с ограничением количества точек, влияющих на расчет каждой элементарной ячейки создаваемой блочной модели. Результаты расчетов представляет Таблица 2.12.

Таблица 2.12. Влияние количества точек на расчетные значения модели в блоке

Кол-во точек	Ср. значения	Дисперсия оценки
1	2.2932	0.014
3	2.301	0.01011
5	2.308	0.0082
7	2.3132	0.0076
10	2.3182	0.0075
12	2.32	0.0072
20	2.32	0.00725
25	2.32	0.00723

Как видно из таблицы и Рис. 2.60, оптимальным и надежным количеством должно быть не менее 12 точек для оценки каждой ячейки блочной модели.

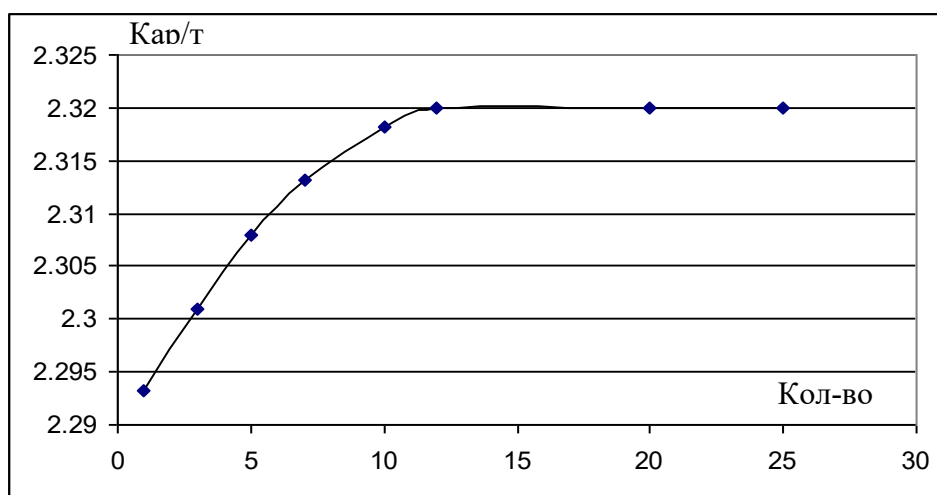


Рис. 2.60. Зависимости содержания от количества расчетных точек (значений)

При данных расчетах рассчитывались также дисперсия оценки и стандартная ошибка, параметры, имеющие значительно снижение при увеличении количества точек расчета (Рис. 2.61).

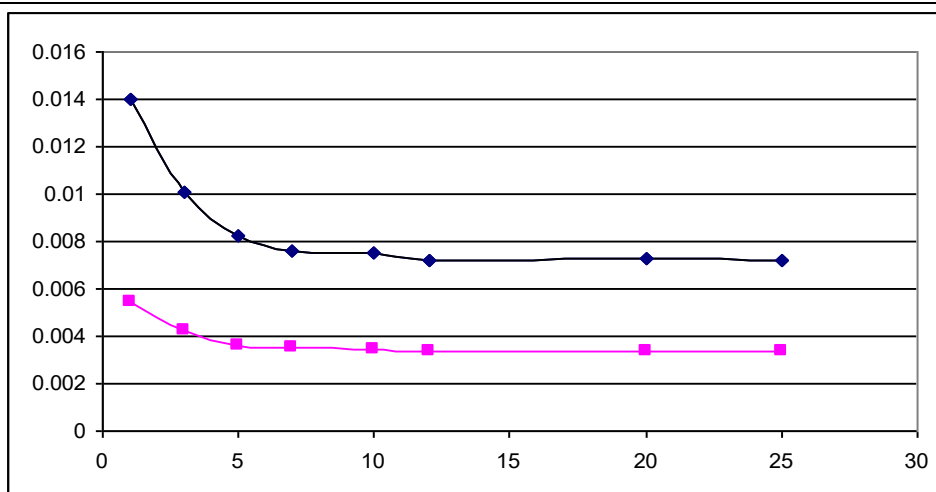


Рис. 2.61. Зависимости дисперсии и стандартной ошибки от количества расчетных точек

Учитывая приведенные выше рассуждения и расчеты, была создана модель месторождения по распределению объемного веса в пределах кимберлитового тела, при этом достоверность определялась количеством точек, принимающих участие в расчете (Рис. 2.62).

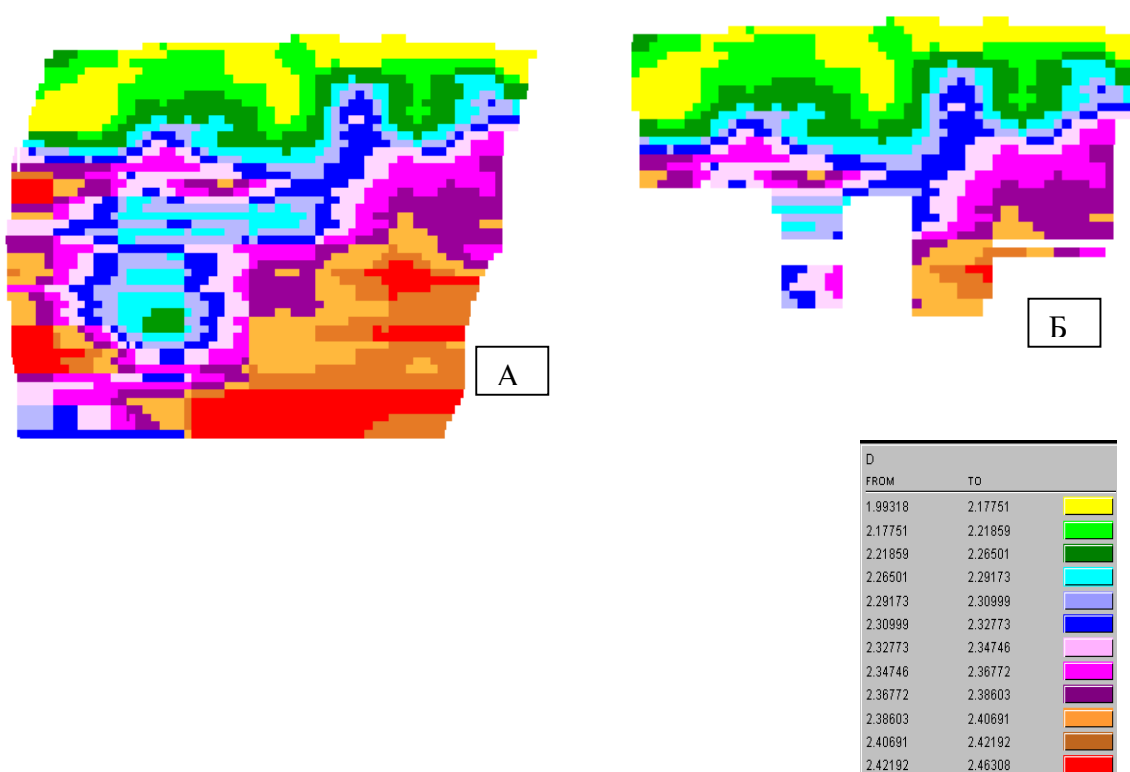


Рис. 2.62. Вертикальный разрез модели распределения объемного веса в кимберлитовом теле (А) и модель с высокой достоверностью оценки (Б)

Как видно из представленного рисунка, только верхняя часть месторождения имеет достаточно надежную оценку признака и может быть использована в дальнейшем. Кроме того, очевидно, что распределение объемного веса весьма неравномерно, что очень важно для дальнейшего применения модели при подсчете запасов и более точной оценке экономической эффективности отработки месторождения.

2.8 ИНТЕРПОЛЯЦИЯ

Интерполяция - процесс, при котором точки данных, рассеянные в пространстве и во времени, преобразуются в непрерывный массив или решетку численных значений - грид. Исходные данные для грида могут представлять собой все что угодно, начиная от топографических высот и уровня загрязнения на промышленных предприятиях в регионе до содержания полезного компонента в обнажениях горных пород. Точки данных должны при этом иметь местоположение с некоторыми координатами X, Y, Z и измеренным значением атрибута C. При проведении вычислений используется декартова система координат.

Двумерный грид можно представить в виде решетки воображаемых линий, перекрывающих исходные точки данных, как это показано на Рис. 2.63.

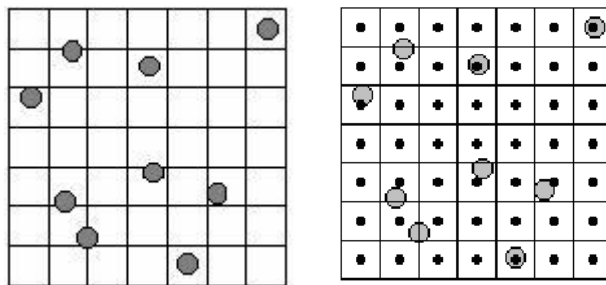


Рис. 2.63. Интерполяция рассеянных точек данных в узлы регулярной сетки грид.

Для 3D интерполяции реализованы следующие методы: метод ближайшей точки, взвешенные обратные расстояния, ближайшие соседи и кригинг.

2.8.1 МЕТОД БЛИЖАЙШЕЙ ТОЧКИ

Данный метод является единственным, позволяющим интерполировать любые типы данных для любых типов решеток путем присвоения атрибутов ближайшей точки текущему узлу решетки GRID или сетки MESH. При этом интерполируемые свойства, геопоказатели или атрибуты исходных точек могут быть как вещественными, числовыми, так и символьными или текстовыми. По сути в данном методе в массиве исходных точек данных отыскивается ближайшая к узлу интерполяции точка и все атрибуты найденной точки автоматически переносятся в узел решетки. Процесс повторяется для всех узлов решетки.

2.8.2 ЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД

В методе *линейной интерполяции* вначале выполняется триангуляция рассеянных точек во временную сетку TIN. Исходя из предположения, что поверхность внутри каждого треугольника изменяется линейно, сетка TIN описывает кусочно-линейную поверхность объекта или границы раздела сред.

Уравнение плоскости, задаваемое тремя вершинами какого-либо треугольника, имеет следующий вид:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2.30)$$

где коэффициенты A, B, C и D вычисляются для координат трех вершин (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3) как:

$$\begin{aligned} A &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2) \\ B &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2) \\ C &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \\ D &= -Ax_1 - By_1 - Cz_1 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Уравнение плоскости может быть записано также в виде:

$$z = f(x, y) = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C} \quad (2.32)$$

Эта форма уравнения плоскости используется для расчета высотной отметки z в любой точке треугольника.

При линейной схеме интерполяции сама процедура вычисления значения экстраполяции вне выпуклой оболочкой невозможна, так как сетка TIN покрывает только выпуклую оболочку множества рассеянных точек. Поэтому всем узлам вне выпуклой оболочки множества рассеянных точек обычно присваивается некоторое экстраполируемое значение, по умолчанию равное, например, максимальной высотной отметке точек данных или выбираемое пользователем.

Для 3D случая линейной интерполяции по рассеянным пространственным точкам строится сеть тетраэдров и определяется принадлежность каждого узла трехмерного грида определенному тетраэдру. Затем по уравнению гиперплоскости в узле определяется значение геопоказателя, которое присваивается текущей элементарной ячейке блочной модели.

2.8.3 МЕТОД ОБРАТНЫХ РАССТОЯНИЙ

Одним из наиболее распространённых методов интерполяции рассеянных точек является метод обратных расстояний или метод инверсно-дистанционного взвешивания (*IDW*). Методы взвешивания по обратным расстояниям основаны на предположении, что на значение некоторого узла поверхности интерполяции влияют, главным образом, значения ближайших рассеянных точек данных и в меньшей степени значения в удаленных точках данных. Поверхность интерполяции является взвешенным средним значением в точках данных и весовой коэффициент, приписываемый каждой рассеянной точке, обратно пропорционален расстоянию от данной рассеянной точки до узла интерполяции.

Уравнение простой формы взвешенной интерполяции по методу обратных расстояний имеет следующий вид:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (2.33)$$

где

n - число рассеянных точек в множестве;

f_i - заданная функция значений в рассеянных точках (например, множество значений);

w_i - весовые коэффициенты функции, приписываемые каждой рассеянной точке.

Классическая форма весовой функции следующая:

$$w_i = \frac{r_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n r_j^{-p}} \quad (2.34)$$

где p - некоторое положительное вещественное число, называемое степенным параметром (обычно, $p=2$) и r_i - расстояние от рассеянной точки до узла интерполяции или

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.35)$$

где (x, y) - координаты узла интерполяции и (x_i, y_i) - координаты каждой рассеянной точки. Весовая функция меняет свои значения от единицы в рассеянной точке до некоторого стремящегося к нулю значения при увеличении расстояния от рассеянной точки. Весовые функции нормируются так, что сумма их весов равна единице.

Действие весовой функции состоит в том, что интерполяционная поверхность учитывает каждую рассеянную точку и наиболее сильное влияние на нее оказывают рассеянные точки ближе всего расположенные к узлу интерполяции.

При взвешенной интерполяции по обратным расстояниям вместо стандартной функции дистанционного взвешивания (2.34) иногда удобнее использовать следующее уравнение:

$$w_i = \frac{\left[\frac{R - r_i}{Rr_i} \right]^2}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{R - r_j}{Rr_j} \right]^2} \quad (2.36)$$

где r_i - расстояние из узла интерполяции до i -ой рассеянной точки, R - расстояние от узла интерполяции до наиболее удаленной рассеянной точки, и n - полное число рассеянных точек. Это уравнение в ряде случаев обеспечивает лучшие результаты интерполяции, чем по формуле (2.34).

Весовая функция зависит от расстояния и радиально симметрична относительно каждой рассеянной точки. В результате при интерполяции высотных отметок интерполяционная поверхность достаточно симметрична относительно каждой точки и направлена в сторону средней высоты между рассеянными точками.

Трехмерный случай

Единственное отличие 3D версии *IDW* интерполяции заключается в том, что уравнения для узловых функций включают дополнительно Z компоненту.

3D уравнения для метода *IDW* идентичны 2D уравнениям, а расстояния между точками вычисляются с помощью формулы:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (2.37)$$

где (x, y, z) - координаты интерполяции точки и (x_i, y_i, z_i) есть координаты каждой из рассеянных точек.

2.8.4 МЕТОД СОСЕДНИХ РЕГИОНОВ

Данный метод интерполяции (*Natural Neighbor Interpolation – NNI*) имеет много положительных сторон. Он может применяться как для интерполяции, так и экстраполяции, и кластеризации рассеянных точек. Интерполяция *NNI* была впервые введена в работе Sibson (1981). Более детальное описание данного метода интерполяции в многомерных пространствах приведено в работе Owen (1992).

Основное уравнение интерполяции *NNI* аналогично используемому в методе интерполяции *IDW*. Так же как и при *IDW* интерполяции, узловые функции могут быть либо постоянными, градиентными плоскостями или квадратичными. Различие между *IDW* интерполяцией и *NNI* интерполяцией по методу ближайших соседей состоит в том, что данный метод используется как для расчета весов, так и для выбора подмножества рассеянных точек интерполяции.

Интерполяция *NNI* основана на Сети полигонов Вороного множества рассеянных точек. Сеть полигонов Вороного может быть построена из Делоне триангуляции множества рассеянных точек. Делоне триангуляция является сеткой TIN которая строится при условии выполнения критерия Делоне (см. раздел о триангуляции).

Имеется один полигон Вороного в сети для каждой рассеянной точки. Полигон занимает всю область, которая ближе к включенной рассеянной точке, чем к любой другой рассеянной точке. Полигоны в интерьере множества рассеянных точек являются замкнутыми полигонами, а полигонами на выпуклой оболочке множества являются открытыми полигонами.

Каждый полигон Вороного строится с использованием окружающих треугольников по триангуляции Делоне рассеянных точек. Вершины полигонов Вороного совпадают с центрами окружающих треугольников.

Как показано на Рис. 2.64, полигоны Вороного рассеянных точек по периметру сетки TIN являются открытыми полигонами. Поскольку такие полигоны имеют

неограниченную площадь, они не могут напрямую использоваться для интерполяции по методу ближайших соседей. Чтобы как-то ограничить эти полигоны, комплект рассеянных точек искусственно заключается в границы прямоугольной области или рамки. Полигоны обрезаются границами рамки.

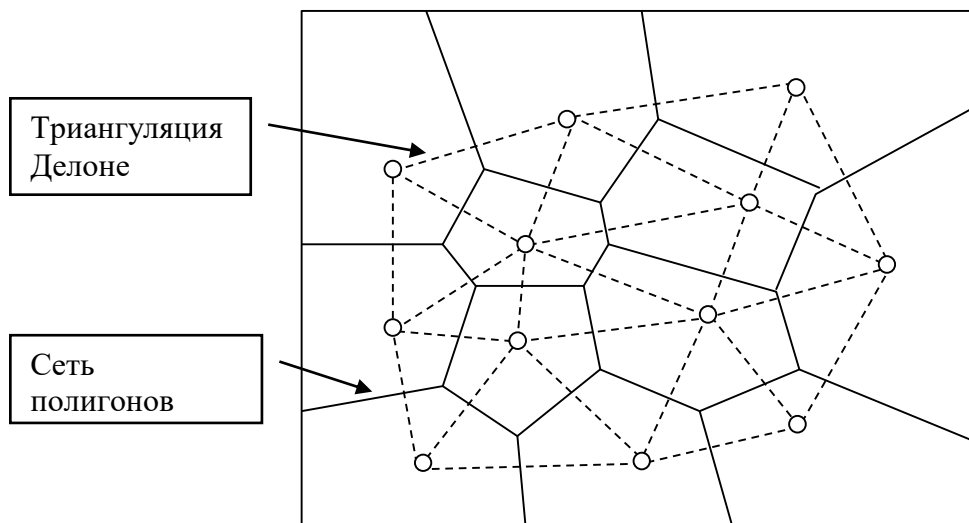


Рис. 2.64. Ограничительная рамка при интерполяции по методу ближайших районов

В границах площадей полигонов Вороного по периметру модели рассеянных точек можно выполнять экстраполяцию (оценивая значения интерполяции точек вне выпуклой оболочки множества рассеянных точек) также как и интерполяцию. Однако, вычисленное значение экстраполяции некоторым образом зависит от относительных размеров ограничивающей рамки и размеров множества рассеянных точек. Чем больше ограничивающая рамка, тем больше влияние периметра рассеянных точек на экстраполируемое значение. Если ограничивающая рамка очень большая, экстраполируемые значения будут зависеть лишь от точек на выпуклой оболочке множества рассеянных точек. Если ограничивающая рамка незначительно больше множества рассеянных точек, экстраполируемые значения будут зависеть от внутренних рассеянных точек в окрестности узла интерполяции. В дополнение к периметру рассеянных точек вблизи узла интерполяции относительный размер ограничивающей рамки можно изменить с помощью диалога Опции NNI. Кроме того, этот диалог можно использовать для полного отключения экстраполяции.

Трехмерный случай

Уравнения для 3D версии NNI аналогичны двумерному случаю. В 3D версии рассеянные точки разбиваются сетью тетраэдров, удовлетворяющих критерию Делоне. Тетраэдры используются для задания сети полиэдров Вороного (или полиэдров вместо полигонов в 2D). Локальные координаты для интерполяции базируются на покрываемых полиэдрами Вороного объемах, а не на покрываемых полигонами Вороного площадях, как в случае 2D.

Все что касается ограничивающей рамки применимо и для 3D случая. Различие состоит лишь в том, что для 3D случая ограничивающая рамка представляет собой параллелепипед, а не прямоугольник.

2.8.5 ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ РЕГРЕССИЯ

. Фактически полиномиальная регрессия не является методом интерполяции поскольку не предсказывает неизвестные значения, а является методом построения поверхности

тренда. Полиномиальная регрессия используется для определения тренда и структуры изменения данных

Анализ поверхности тренда

Анализ тренд - поверхности отличается от методов кригинга и обратных расстояний, которые пытаются оценить "локальные" характеристики; анализ поверхности тренда является математическим методом, который используется для разделения "региональных" и "локальных" флуктуаций [26]. Что принять за "локальную" или "региональную" составляющую также часто является субъективным и зависит от масштаба, а региональный тренд может меняться при смене масштаба. Применение тренд анализа позволяет разделить наблюдаемые точки данных на эти два компонента. Тренд может быть определен тремя компонентами (Davis, 1973, [26]):

1. Тренд зависит от географических координат; то есть распределение вещественных свойств может рассматриваться как функция местоположения.
2. Тренд является линейной функцией вида:

$$V = b_1X + b_2Y + \dots$$

где V - значение в описываемом местоположении, b - коэффициенты, а X и Y - географические координаты.

3. Оптимальный тренд или линейная функция должны находится по методу наименьших квадратов.

Анализ поверхности тренда в основном основан на технике линейного регрессионного анализа, но применяется к двух и трехмерному случаю вместо простой аппроксимации кривых. Линейное уравнение первого порядка для тренда имеет вид:

$$V = b_0 + b_1X + b_2Y$$

Таким образом, точка наблюдения со значением V может быть описана как линейная функция некоторого постоянного значения (b_0) связанного со средним значением множества, а также с компонентами восток-запад (b_1) и север-юг (b_2). Для нахождения этих трех неизвестных у нас есть три уравнения [26]:

$$\sum_{i=1}^n V_i = b_0 n + b_1 \sum_{i=1}^n X_i + b_2 \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$\sum_{i=1}^n X_i V_i = b_0 \sum_{i=1}^n X_i + b_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^n X_i Y_i$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i V_i = b_0 \sum_{i=1}^n Y_i + b_1 \sum_{i=1}^n X_i Y_i + b_2 \sum_{i=1}^n Y_i^2$$

где n - число точек данных. Решая эти уравнения совместно мы получаем "наилучшую подгонку", определяющую регрессию по методу наименьших квадратов в двухмерном случае для поверхности тренда первого порядка (плоскости). Это можно переписать в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 & \sum_{i=1}^n X_i Y_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i & \sum_{i=1}^n X_i Y_i & \sum_{i=1}^n Y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n V_i \\ \sum_{i=1}^n X_i V_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i V_i \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Данный подход может быть также применён для поверхностей более высокого порядка и для трехмерного случая. Соответствующие 3D уравнения до четвертого порядка имеют следующий вид:

$$V = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z,$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n Y_i & \sum_{i=1}^n Z_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 & \sum_{i=1}^n X_i Y_i & \sum_{i=1}^n X_i Z_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i & \sum_{i=1}^n X_i Y_i & \sum_{i=1}^n Y_i^2 & \sum_{i=1}^n Y_i Z_i \\ \sum_{i=1}^n Z_i & \sum_{i=1}^n X_i Z_i & \sum_{i=1}^n Y_i Z_i & \sum_{i=1}^n Z_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n V_i \\ \sum_{i=1}^n X_i V_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i V_i \\ \sum_{i=1}^n Z_i V_i \end{bmatrix}$$

Общее уравнение второго порядка двумерной поверхности имеет следующий вид:

$$V = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 X^2 + b_4 XY + b_5 Y^2$$

Уравнение третьего порядка для двумерной поверхности:

$$V = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 X^2 + b_4 XY + b_5 Y^2 + b_6 X^3 + b_7 X^2 Y + b_8 XY^2 + b_9 Y^3$$

Уравнение четвертого порядка для двумерной поверхности:

$$V = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 X^2 + b_4 XY + b_5 Y^2 + b_6 X^3 + b_7 X^2 Y + b_8 XY^2 + b_9 Y^3 + b_{10} X^4 + b_{11} X^3 Y + b_{12} X^2 Y^2 + b_{13} XY^3 + b_{14} Y^4$$

Третий порядок 3D поверхности:

$$V = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 XY + b_5 XZ + b_6 YZ + b_7 X^2 + b_8 Y^2 + b_9 Z^2 + b_{10} X^2 Y + b_{11} XY^2 + b_{12} X^2 Z + b_{13} XZ^2 + b_{14} Y^2 Z + b_{15} YZ^2 + b_{16} X^3 + b_{17} Y^3 + b_{18} Z^3$$

Четвертый порядок 3D поверхности:

$$V = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 XY + b_5 XZ + b_6 YZ + b_7 X^2 + b_8 Y^2 + b_9 Z^2 + b_{10} X^2 Y + b_{11} XY^2 + b_{12} X^2 Z + b_{13} XZ^2 + b_{14} Y^2 Z + b_{15} YZ^2 + b_{16} X^3 + b_{17} Y^3 + b_{18} Z^3 + b_{19} X^3 Y + b_{20} X^2 Y^2 + b_{21} XY^3 + b_{22} X^3 Z + b_{23} X^2 Z^2 + b_{24} XZ^3 + b_{25} Y^3 Z + b_{26} Y^2 Z^2 + b_{27} YZ^3 + b_{28} X^4 + b_{29} Y^4 + b_{30} Z^4$$

Анализ изменчивости регрессии поверхности тренда

Тренд-поверхность заданного порядка может аппроксимировать любой набор пространственных данных, но это не означает, что она будет представлять собой полезную или адекватную модель. Каждый член полиномиального уравнения тренд поверхности имеет соответствующую ошибку и сама тренд поверхность используется только для оценки "регионального" тренда. "Локальные" флуктуации можно рассматривать как ошибки в регрессионном анализе тренд поверхности. Для оценки "полезности" тренд поверхности необходимо вычислить несколько характеристик:

- SS_T = Полная сумма квадратов.
- SS_R = Регрессионная сумма квадратов.
- MS_R = Среднеквадратическая регрессия.
- SS_E = Погрешность суммы квадратов.
- MS_E = Среднеквадратическая ошибка.
- R = Множественный коэффициент корреляции.
- $F_{\text{statistic}}$ = Тестовая статистика, используемая для определения "полезности" регрессии.

где:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n V^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n V\right)^2}{n}, \quad MS_T = \frac{SS_T}{n-1},$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^n \tilde{V}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{V}\right)^2}{n}, \quad MS_R = \frac{SS_R}{m},$$

$$SS_E = SS_T - SS_R, \quad MS_E = \frac{SS_E}{n-m-1},$$

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T}, \quad F_{statistic} = \frac{MS_R}{MS_E},$$

где n - число наблюдений, m - число коэффициентов в уравнении тренд анализа. R , R^2 и $F_{statistic}$ - параметры, используемые для оценки правильности аппроксимации. R - коэффициент множественной корреляции и $R^2 \times 100\%$ - процент вариации данных, объясняемый региональной тренд поверхностью [26]. $F_{statistic}$ используется совместно с F-тестом для определения того насколько существенно группа коэффициентов тренд поверхности отличается от нуля; то есть эффект регрессии незначительно отличается от случайных колебаний в данных. В формальном статистическом представлении, F-тест значимости аппроксимации проверяет гипотезу (H_0) и альтернативную ей гипотезу (H_1):

$$H_0 : b_1 = b_2 = b_3 = L = b_m = 0$$

$$H_1 : b_1, b_2, b_3, L = b_m \neq 0$$

Факт прохождения теста означает, что коэффициенты частичной регрессии равны нулю, то есть регрессии нет. Если вычисленное значение F превышает табличное значение F , то нулевая (NULL) гипотеза отбрасывается и принимается альтернативная, то есть что все коэффициенты регрессии являются значимыми и регрессия полезна, то есть все коэффициенты регрессии значимы и регрессия может быть полезна.

В дополнение к проблемам получения "хорошей" подгонки для тренд поверхности, имеется некоторое число подводных камней для этого метода:

1. Необходимо проводить адекватный контроль данных. Число точек наблюдения должно быть больше числа коэффициентов.
2. Важно учитывать расстояние между точками наблюдений. Оно может влиять на размер и разрешение видимых структур. Кластеризация точек может вызывать определенные проблемы или отклонения. Распределение точек может влиять на форму поверхности.
3. Существует проблема ближайших границ. Поверхность может "вздуваться" по углам. По этой причине важно иметь буферную зону вокруг области исследования. Встает проблема интерполяции данных при экстраполяции за пределами области наблюдений.

2.8.6 КРИГИНГ

Кригинг является геостатистическим методом интерполяции, названным в честь Южно-африканского горного инженера D.G.Krige, который разработал эту методику в попытке более точно предсказать рудные запасы. За прошедшие годы кригинг стал фундаментальным инструментом в области геостатистики.

Традиционная геостатистика развилась на базе приложений для горной промышленности, где обычно ведётся интенсивное опробование массива. В этой связи, применение базовых геостатистических методов реализуется в следующей эмпирической последовательности:

1. Рассчитываются значения пространственной статистики (обычной вариограммы) для заданных в пространстве по направлениям регулярных лагов.
2. Экспериментальная вариограмма аппроксимируется математической функцией (например, сферической, экспоненциальной и т.д.).
3. На регулярной решетке, покрывающей пространство месторождения, реализуются различные процедуры интерполяции (кригинг) или процедуры имитации (последовательная имитация, имитацию отжигом и т.д.).

Следует отметить, что геологические или "субъективные" знания напрямую не входят в эти процедуры.

Кригинг основан на предположении, что интерполяционный параметр может быть представлен в качестве регионализированной переменной. Также как и в методе обратных расстояний при кригинге узлам присваиваются веса в зависимости от окружающих данных. Однако одним из основных преимуществ метода кригинга является то, что весовые значения вычисляются для того, чтобы минимизировать ошибку дисперсии.

Регионализированная переменная является промежуточной между действительно случайной переменной и полностью детерминированной переменной, в том смысле что она непрерывно изменяется при переходе от одной позиции к другой и поэтому точки, расположенные близко, имеют некоторую степень пространственной корреляции, в то время как удаленные друг от друга точки являются статистически независимыми. Кригинг включает ряд процедур линейной регрессии, которые минимизируют оценку дисперсии для некоторой предопределенной модели ковариации.

Интерполяция по методу Кригинга по сути является геостатистическим способом оптимизации среднеблочных оценок геолого-промышленных параметров месторождений – содержаний, метропроцентов, мощности рудных тел, плотности и, в конечном счёте, запасов полезного ископаемого и ценных компонентов. По сравнению с другими методами интерполяции дополнительная точность оценки в методе Кригинга достигается на основе обработки информации о структуре пространственной изменчивости подсчётных параметров, геометрии разведочной сети, системы опробования и величины оцениваемых блоков.

Теории и практике применения кригинга в геологии и горном деле посвящено большое число работ [24, 38].

Наиболее общепринятое теоретическое обоснование кригинга достигается в рамках теории стационарных случайных функций. Основной структурной характеристикой этой модели служит автоковариационная функция

$$C(h) = E\{[Z(x) - E_z][Z(x+h) - E_z]\}, \quad (2.39)$$

где $Z(x)$, $Z(x+h)$ - значения пространственной переменной Z в точках поля V с координатами x и $x+h$; $E\{\dots\}$ - оператор математического ожидания, обозначающий процедуру определения среднего значения; $E_z = E\{Z(x)\}$ - среднее значение Z в пределах поля V .

В качестве обобщающей функции, синтезирующей свойства поля V , в геостатистике используется собственная функция рассеивания или вариограмма

$$\gamma(h) = 0.5E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}. \quad (2.40)$$

Вариограмму можно выразить через автоковариационную функцию, т.к.

$$\gamma(h) = C(0) - C(h). \quad (2.41)$$

Для характеристики структуры поля пространственной переменной Z кроме вариограммы можно использовать и автокорреляционную функцию

$$\rho(h) = C(0) - C(h), \quad (2.42)$$

и нормированную вариограмму

$$\gamma'(h) = \gamma(h) / C(0), \quad (2.43)$$

что позволяет исключить из рассмотрения различные размерности и диапазоны изменения представленных пространственных переменных.

Для пластовых месторождений можно рассматривать точки в пределах двумерного геометрического поля на площади S . При этом атрибуты точек опробования, определяющие мощность, содержание и линейный запас или метропроцент стратиформной залежи, выступают в качестве пространственных переменных таким образом, что $Z(x) > 0$ в поле S и $Z(x) = 0$ за его пределами. В этом случае поле пространственных переменных месторождения обычно формируется за счёт двух практически независимых составляющих: глобальной (зональной или регионализированной) переменной, обусловленной трендом параметров, и локальной или случайной составляющей, образующейся, как правило, за счёт природной неоднородности массива горных пород.

$$Z(x) = f(x) + l(x), \quad (2.44)$$

где $f(x)$ – региональная изменчивость геологического параметра (тренд), обусловленная изменением условий минерализации или осадконакопления при формировании залежей; $l(x)$ – локальная изменчивость, образующаяся за счет неоднородности горных пород и руд, случайной структурно-текстурной и физико-химической колеблемости свойств массива в точках опробования.

С учетом аддитивности случайной функции можно записать:

$$\gamma(h) = \gamma(h) + \gamma, \quad (2.45)$$

где $\gamma(h)$ – вариограмма зональной изменчивости (тренда); $\gamma = D^2 l$ – вариограмма локальной изменчивости, определяемая как ее дисперсия.

Основная идея кригинга заключается в определении наилучшей или оптимальной линейной оценки G_s подсчетного параметра (мощности, содержания металла), рассматриваемого как пространственная переменная Z в пределах участка поля S :

$$Y_s = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (2.46)$$

где n – общее количество участвующих в оценке разведочных пересечений; z_i – значение пространственной переменной Z в точке, определяемой вектором координат x_i ; w_i – коэффициент кригинга для i -го разведочного пересечения.

Следует отметить, что оценка кригинга использует результаты опробования разведочных пересечений, расположенных как внутри, так и за пределами оцениваемого участка. Целесообразность этого вытекает из существующей пространственной корреляции переменной Z в пределах всего поля S . Из условия несмещенности оценки подсчетного параметра по отношению к данным разведочного опробования следует

$$\sum_i^n w_i = 1 \quad (2.47)$$

Используемые при подсчете запасов среднеарифметический и средневзвешенный способы вычисления оценок параметров могут рассматриваться как частные случаи наилучшей оценки кригинга, если принять $w_i = 1/n$ – для среднеарифметической оценки мощности и $w_i = m_i / \sum_{j=1}^n m_j$ для средневзвешенной на мощность оценки содержания.

Требование к несмещенности должно выполняться в любом случае.

Оценка G_s в узле сетки интерполяции разведочных данных, являясь специфической функцией поля пространственной переменной Z , геометрии оцениваемого участка S , геометрии разведочной системы ДН и свойств алгоритма

оценки, может рассматриваться одновременно как случайная величина. Эффект случайности при этом порождается пространственно независимым и априорно непредсказуемым расположением разведочной системы по отношению к фактическому положению оцениваемого объекта в недрах. С этих позиций основным критерием эффективности определения параметров залежи является размер дисперсии оценивания σ_y^2 , который при фиксированных результатах разведки может быть изменен, очевидно, только варьированием величины соответствующих коэффициентов кригинга w_i .

В этом случае дисперсия оценки

$$\sigma_y^2 = E\{[Y_s - Z_s]^2\}, \quad (2.48)$$

после преобразований, учитывающих свойства случайных функций и оператора $E\{\dots\}$, может быть выражена через автоковариационную функцию

$$\sigma_y^2 = D_s^2 + \sum_i^n \sum_j^n C(h_{ij}) w_i w_j - 2 \sum C_s(x_i) w_i \quad (2.49)$$

где $C(h_{ij})$ - ковариация i -го и j -го разведочных пересечений, расположенных на расстоянии $h_{ij} = |x_i - x_j|$; D_s^2 - дисперсия фактических средних значений Z_s для участков, имеющих геометрическую форму s , в пределах поля S ; $C_s(x_i)$ - ковариация i -го разведочного пересечения и оцениваемого участка s .

Два неизвестных параметра D_s и C_s в последнем слагаемом могут быть также выражены через автоковариационную функцию C :

$$D_s^2 = \frac{1}{S^2} \int_s \int_s C(u - v) du dv \quad (2.50)$$

$$C_s(x_i) = \frac{1}{S} \int_s C(u - x_i) du \quad (2.51)$$

или через вариограмму, принимая во внимание вышеприведенные формулы её связи с автоковариацией.

Для определения коэффициентов w_i , обеспечивающих наименьшую дисперсию оценки геологических параметров с учетом равенства единице суммы всех коэффициентов, необходимо найти минимум выражения

$$F = \sigma_y^2 + 2\lambda \sum_i^n w_i \quad (2.52)$$

где $\lambda < 0$ - множитель Лагранжа. Подставляя в данную формулу ранее полученное выражение для дисперсии σ^2 и последовательно дифференцируя по неизвестным коэффициентам, получим общую систему $n+1$ уравнений стандартного кригинга

$$\begin{aligned} \sum_j^n w_j C(h_{ij}) + \lambda &= C_s(x_i) \\ \sum_j^n w_j &= 1 \end{aligned} \quad (2.53)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ - обозначает номер уравнения.

При известной вариограмме или автоковариационной функции данная система уравнений легко разрешима относительно коэффициентов кригинга k_i .

Процедуры кригинга в большинстве компьютерных пакетов горно-геологического моделирования основаны на библиотеке *Geostatistical Software Library, GSLIB* [104]. Поскольку кригинг является достаточно сложным методом интерполяции и включает многочисленные опции, полное описание кригинга выходит за рамки данного руководства. Для получения более подробной информации пользователю рекомендуется познакомиться со специальной литературой.

Для решения задач интерполяции геологических показателей были предложены многочисленные способы кригинга различной степени сложности, однако двумя наиболее известными способами являются *Обычный кригинг* и *Универсальный кригинг*.

Обычный кригинг

Первый шаг обычного кригинга состоит в расчёте экспериментальной вариограммы по рассеянным точкам и аппроксимации её некоторой моделью, предназначенной для интерполяции. Для кригинга можно использовать различные выражений вычисления дисперсии, но она обычно вычисляется как полуразность квадрата по формуле, как это было описано выше в разделе по оценке изменчивости геологических показателей.

Основное уравнение обычного кригинга выглядит следующим образом:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (2.54)$$

где n - число рассеянных точек множества, f_i значения рассеянных точек, и w_i являются весами, приписываемые каждой рассеянной точке.

Это уравнение аналогично уравнению, используемому при интерполяции по методу обратных расстояний, за исключением того, что вместо использования весов на основе произвольной функции расстояния, выбор весов кригинга основан на модельной вариограмме. Например, для интерполяции в узле P на основе окружающих точек P_1 , P_2 , и P_3 , должны быть найдены веса w_1 , w_2 , и w_3 . Веса находятся через решение соответствующих уравнений:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) &= S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{13}) + w_2 S(d_{23}) + w_3 S(d_{33}) &= S(d_{3p}) \end{aligned} \quad (2.55)$$

где $S(d_{ij})$ есть модельная вариограмма, оцененная на расстоянии, равном расстоянию d между точками i и j . Например, $S(d_{1p})$ есть модельная вариограмма, оцененная на расстоянии, равном удалению точек P_1 и P . Так как необходимо чтобы сумма весов была равна единице, то добавляется следующее уравнение

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.0 \quad (2.56)$$

Поскольку введены четыре уравнения и три неизвестных, то в эту систему уравнений добавляется переменная λ . Окончательная система уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) + \lambda &= S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) + \lambda &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{13}) + w_2 S(d_{23}) + w_3 S(d_{33}) + \lambda &= S(d_{3p}) \\ w_1 + w_2 + w_3 + 0 &= 1.0 \end{aligned} \quad (2.57)$$

Эти уравнения решаются относительно весов w_1 , w_2 , и w_3 . Затем значение функции f в интерполяционном узле вычисляются как:

$$f_p = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (2.58)$$

Таким образом, при использовании вариограммы для расчета весов ожидаемая ошибка оценивания минимизируется по методу наименьших квадратов. По этой причине кригинг, как иногда говорят, дает наилучшую линейную несмещенную оценку. Однако, минимизация ожидаемой ошибки по методу наименьших квадратов не всегда самый лучший критерий и в некоторых случаях другие схемы интерполяции дают более приемлемые результаты.

Важной особенностью кригинга является то, что вариограмма может использоваться для вычисления ожидаемой ошибки оценивания в каждом узле интерполяции, так как ошибка оценивания есть функция расстояния до окружающих рассеянных точек. Дисперсия оценивания может быть вычислена как:

$$S^2_{\varepsilon} = w_1 S(d_{1p}) + w_2 S(d_{2p}) + w_3 S(d_{3p}) + \lambda \quad (2.59)$$

Другими словами, дисперсия оценивания есть взвешенное среднее дисперсии расстояний от узла интерполяции до каждой точки, используемой в вычислениях плюс вклад от переменной Лагранжа, λ . Можно вычислить дисперсию оценивания для каждого узла интерполяции вместе с интерполяцией текущего показателя для моделей типа MESH или GRID.

Универсальный Кригинг

Одно из допущений обычного кригинга состоит в том, что оцениваемая поверхность считается стационарной. То есть, среднее значение f рассеянных точек является постоянным во всех регионах множества. Это слабое предположение, если имеется постепенный тренд или наклон поверхности. Универсальный кригинг пытается рассчитать тренды для этой поверхности.

Одним из важнейших шагов универсального кригинга является вычисление дрефта. Дрифт представляет собой полиномиальную функцию, моделирующую среднее значение f для рассеянных точек. Остаток есть разность между дрефтом и фактическим f значениями рассеянных точек. Поскольку остатки должны быть стационарны, то кригинг выполняется на остатках и интерполяционные остатки добавляются в дрефт для вычисления оценки f значения.

Для 2D кригинга, полиномиальная функция может быть представлена в виде:

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \quad (2.60)$$

Значения коэффициентов $a_0..a_5$ находят путем подгонки по методу наименьших квадратов в самом начале кригинга. При необходимости изменить порядок дрефта соответствующие коэффициенты приравниваются нулю. Например, наклон плоскости можно смоделировать используя лишь коэффициенты $a_0..a_2$.

Трехмерный случай

Имеется ряд различий между 2D и 3D версиями кригинга. Во-первых, если выполняется универсальный кригинг, то для расчёта *дрифта* используется больше коэффициентов. Дрифт в 3D версия кригинга находится, например, следующим образом:

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6z^2 + a_7xy + a_8xz + a_9yz, \quad (2.61)$$

где каждый из коэффициентов задаётся пользователем компьютерной системы.

Основное различие между 3D и 2D версиями кригинга состоит в способе трактовки анизотропии. При вычислении экспериментальных вариограмм, вектор направления задается двумя углами: азимутом и углом падения. Азимутальный угол измеряется в градусах по часовой стрелке из положительной оси Y. Угол падения измеряется отрицательными градусами от горизонтальной плоскости.

В стандартном случае анизотропия может быть смоделирована по трем ортогональным направлениям. Три экспериментальные вариограммы, соответствующие трем главным осям анизотропии находятся путем тестирования нескольких комбинаций направляющего вектора. Комбинация, которая дает наибольшее различие диапазона для трех экспериментальных вариограмм соответствует главным осям. Одна из осей должна быть выбрана пользователем как главная ось. Обычно указывается ось вдоль которой экспериментальная вариограмма имеет наибольший ранг (наибольшую непрерывность).

После определения трех осей анизотропии они должны быть описаны посредством трех углов: простирания, падения и наклона, которые должны быть учтены при расчёте экспериментальной вариограммы и подбора моделей для кригинга.

2.8.7 МЕТОД ИМИТАЦИИ СОСТОЯНИЙ

Имитация состояний или кондиционное моделирование (термин Conditional Simulation переводится также как «Условное моделирование») представляет собой процесс, при котором создаётся множественные, равновероятные пространственные распределения случайных переменных или "реализаций", соответствующих измеренным в определенных позициях данным. Хотя в таких алгоритмах может использоваться

(ко)кригинг, имитацию состояний массива ячеек или блоков регулярных решеток нельзя отождествлять с интерполяцией. С геологической точки зрения, 2D имитация состояния базовых элементов, таких как пачки горных пород и фациальные последовательности, можно рассматривать как некий количественный подход к классической проблеме проведения геологических разрезов в промежуточной области между разведанными пересечениями и участками опробования, такими как обнажения или буровые скважины.

На практике проведение геологических разрезов требует восстановления имеющихся данных на основании понимания соответствующих стратиграфических связей с целью получения правдоподобного описания геологического строения месторождения. Аналогичные требования должны предъявляться к ведению геостатистических расчётов, поэтому компьютерная методика должна быть способна восстанавливать структуру пространственной изменчивости по данным наблюдений и генерировать геологически правдоподобные гетерогенные структуры. В противном случае полученные реализации, хотя и являясь равновероятными, могут оказаться практически недостоверными. Таким образом, задача кондиционного моделирования состоит в том, чтобы сгенерировать пространственные распределения, согласованные с надёжно измеренными данными и выявить действительную картину пространственной изменчивости.

Как ручное проведение разрезов, так и кондиционное моделирование могут в той или иной степени верно отражать гетерогенность геологической среды и являться, очевидно, источником установления гидравлических свойств для моделирования потока и переноса вещества. Хотя ручной подход порой осуществим для 2-D случая, но тем не менее, для решения объёмных 3-D задач определено требуются автоматические или компьютерные методы вычислений. Всё же автоматизированные методы должны проявлять некоторую долю геологической интуиции, которую геолог субъективно привносит в проведенный вручную разрез. Если кондиционный подход оказывается успешным в нахождении геологически правдоподобных результатов, то сразу появляются два очевидных преимущества перед ручным построением:

- 1) применимость к 3D задачам
- 2) возможность создавать неограниченные альтернативы, как средство для оценки неопределённости.

При решении задачи прогнозирования данные опробования по отдельным участкам месторождения могут быть с высокой степенью надёжности распространены на остальную область минерализации.

Определённый ключ к решению проблем практического применения индикаторной (категориальной) геостатистики можно получить на основании установления связи модельных параметров с базовыми наблюдаемыми атрибутами, которые, в случае индикаторных переменных являются следующими:

- объёмные пропорции или содержания
- средние размеры или длины (например, средняя мощность в вертикальном направлении)
- тенденции к смежности (как одна из категорий пород имеет тенденцию локализоваться в пространстве относительно другой)
- направление анизотропии
- пространственные вариации вышеприведённых параметров

Понимание влияния модельных параметров на улучшение кондиционного моделирования обусловлено тем являются ли данные избыточными или редкими. Главное упрощение процедуры блочного моделирования состоит при этом в использовании транзитивных вероятностей вместо индикаторных кросс-вариограмм как меры пространственной изменчивости.

Геостатистический подход к блочному моделированию на основе кондиционной имитации состояний ячеек массива пород включает три главных шага:

1. Расчёт транзитивных вероятностей по данным геологического опробования в разведочных пересечениях
2. Моделирование пространственной изменчивости на основе Марковских цепей
3. Имитация состояния блоков, моделирование строения массива

Подход на основе транзитивных вероятностей и Марковских цепей был разработан для того, чтобы способствовать включению геологической интерпретации и улучшению учёта пространственных кросс-корреляций (тенденций смежности) при построении геостатистических моделей. Дальнейшие детали теории, примеры и сравнения с другими геостатистическими методами можно найти в специальной литературе [24,26,39,101].

Глава 3. Методы оценки запасов минерального сырья

Геолого-промышленная оценка запасов полезных ископаемых представляет собой определение количества и качества полезного ископаемого, которое может быть с экономической выгодой и в установленном законодательством порядке извлечено из недр путём добычи, рудоподготовки и обогащения. Всесторонняя оценка запасов эксплуатируемых месторождений включает в себя не только определение объёмов и содержаний компонентов в залежи, но также учитывает технические и юридические аспекты добычи, обогащения и продажи готовой продукции. Таким образом, список дисциплин, которые в той или иной мере используются при геолого-промышленной оценке запасов полезных ископаемых, включает геологию, маркшейдерию, горное дело, обогащение, экономику горного производства, законодательные вопросы землепользования, охраны недр и экологии. В связи с этим современные компьютерные технологии горно-геологического моделирования должны интегрировать все необходимые программные средства, обеспечивающие решение комплексной задачи оценки геолого-промышленных запасов месторождений полезных ископаемых.

Подсчет запасов выполняется на основе моделирования структуры рудных тел и размещения геопокзателей и является завершающим этапом геолого-промышленной оценки месторождения. Его результаты ложатся в основу строительства проектируемых горнодобывающих предприятий или планирования работы действующих рудников, шахт и карьеров. Разведанные и правильно учтённые запасы полезных ископаемых предоставляют надёжную основу для дальнейшего развития горнодобывающей отрасли, обоснования требуемых капиталовложений и привлечения новых инвестиций. В связи с этим подсчёт запасов всех видов полезных ископаемых имеет важное значение как для отдельных горнодобывающих компаний, так и в целом для государства.

Современные компьютерные технологии геолого-промышленной оценки месторождений открывают возможность обработки больших массивов информации с помощью специализированных программных средств. Необходимые данные к подсчёту запасов должны включать: пространственное распределение элементов, минералов и горных пород; степень изменчивости показателей; содержание компонентов и мощности рудных тел; условия залегания и отработки полезного ископаемого; структурно-морфологические особенности минерализации; гидрогеологические и инженерно-геологические условия эксплуатации и т.д. В итоге детальной разведки месторождения первичные маркшейдерские замеры, геофизические измерения и результаты геологического опробования формируют исходную базу данных, используемую для построения цифровой модели месторождения и оценки величины и качества запасов. Последующая эксплуатационная разведка и оперативное опробование на участках выемки позволяют постоянно дополнять имеющуюся базу данных и детализировать состав и структуру месторождения по мере его освоения.

Прежде чем выполнять непосредственно процедуры подсчёта запасов в рамках принятой классификации разведанности или по степени подготовленности к добыче для месторождения должны быть определены:

- Кондиции на минеральное сырьё
- Параметры для подсчёта запасов
- Способы оконтуривания рудных тел
- Поправочные коэффициенты к исходным данным

Без обоснования и точного определения промышленных кондиций, подсчётных параметров и поправочных коэффициентов результаты компьютерного подсчёта запасов не могут быть правильно оценены и приняты в качестве достоверных с допустимой погрешностью измерения.

Методы подсчета запасов

В геолого-маркшейдерской литературе описано более двух десятков различных методов, которые в той или иной мере находили применение при традиционном ручном подсчёте запасов полезных ископаемых. Среди них можно назвать следующие методы: среднеарифметический суммарный, геологических блоков, эксплуатационных блоков, вертикальных параллельных разрезов, горизонтальных параллельных разрезов, непараллельных разрезов, линейный, многоугольников, треугольников, четырёхугольников, изогипс, изолиний, статистический, среднего угла падения, средней образующей, объёмной палетки Соболевского, косинусов, геоморфологический и др.

При компьютерном подсчёте запасов многие из перечисленных методов объединяются на основе общности алгоритмов вычислений, в то время как другие оказываются полностью устаревшими ввиду использования в них ручных методов счета, номограмм или палеток. Поскольку компьютерное моделирование месторождений выполняется по базе данных геологического опробования и маркшейдерских замеров, то в этом случае автоматически отпадает необходимость подсчёта запасов не по первичным данным, а по отчётным графическим материалам, как это делалось, например, в методах изогипс, изогипс, объёмной палетки, средней образующей, среднего угла падения и некоторых других. Вместе с тем, компьютерные технологии дают возможность использовать при подсчёте запасов такие методы, которые ранее считались слишком сложными и трудоёмкими. К ним относятся методы треугольников, многоугольников и четырёхугольников. Аналогами этих методов при построении полнофункциональных виртуальных моделей залежей являются соответственно методы тетраэдров, полиэдров и прямоугольных блоков.

Ниже приводится описание основных методов подсчёта запасов, которые ранее широко использовались при традиционных «ручных» способах счёта по планам и разрезам и сегодня в той или иной модификации применяются в составе компьютерных технологий геолого-промышленной оценки месторождений.

3.1 КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

Согласно действующему «Положению о порядке учета запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов», все разведанные запасы полезных ископаемых в недрах, которые служат или могут служить сырьевой базой для действующих, реконструируемых и проектируемых предприятий, подлежат обязательной проверке и утверждению Государственной комиссией по запасам (ГКЗ) Российской Федерации. В указанном «Положении...» приводятся требования к постановке запасов на учёт и перечень основных полезных ископаемых и компонентов, запасы которых должны учитываться в формах статистической отчетности. Поступающие в Российский федеральный фонд геологической информации (Росгеолфонд) сведения обрабатываются для составления реестра минеральных ресурсов страны и издания государственного баланса запасов полезных ископаемых с использованием:

- форм государственного федерального статистического наблюдения организаций, осуществляющих поиски, оценку и разведку месторождений полезных ископаемых и их добычу;
- территориальных балансов запасов полезных ископаемых;
- заключений органов государственной экспертизы запасов (ГКЗ, ЦКЗ, ТКЗ), утвержденных в установленном порядке;
- актов о списании запасов, не подтвердившихся при разработке и последующих геологоразведочных работах или утративших промышленное значение и по иным причинам.

Учитывая важное государственное значение информации о запасах полезных ископаемых, их подсчет для эксплуатируемых месторождений должен вестись на основе постоянного пополнения, уточнения и детализации всех геологоразведочных данных:

Общие разведанные запасы подразделяются по трём признакам: *по государственному значению, по степени разведанности и готовности к промышленному освоению*. По государственному значению и постановке на учёт в налоговых органах выделяют балансовые и забалансовые. По степени разведанности – категории **A, B, C₁ и C₂**. По готовности к промышленному освоению – исходные, промышленные, вскрытые, подготовленные и готовые к выемке.

Балансовые запасы - запасы полезного ископаемого, использование которых согласно утвержденным кондициям экономически целесообразно при существующей, либо осваиваемой промышленностью прогрессивной техники и технологии переработки сырья с соблюдением требований по рациональному использованию недр и окружающей среды.

Забалансовые запасы – использование в настоящее время экономически нецелесообразно по кондициям, мощности, сложности разработки и переработки, но в дальнейшем могут быть объектом промышленного освоения.

Промышленными считаются балансовые запасы в пределах проектных границ карьерного (шахтного) поля, подлежащие извлечению из недр согласно техническому проекту разработки месторождения. Промышленные запасы определяются путем исключения из балансовых запасов потерь, предусмотренных техническим проектом. К извлекаемым из недр запасам относятся промышленные запасы за вычетом фактических эксплуатационных потерь.

Погашенные запасы составляют часть балансовых запасов полезного ископаемого, отделенного от массива при ведении очистных, проходческих и вскрышных работ, выданного из недр, а также потерянного при добыче.

Вскрытые, подготовленные и готовые к выемке запасы выделяются из числа промышленных запасов и определяют степень их подготовленности к добыче. При этом вскрытые запасы составляют часть балансовых запасов, подготовленные – часть вскрытых запасов и готовые к выемке – часть подготовленных запасов.

Движение запасов - изменение их количества в результате добычи, разведки или переоценки за установленный период.

Минимально промышленное содержание – содержание полезного компонента, при котором извлекаемая ценность минерального сырья по разрабатываемому участку (блоку) обеспечивает возмещение всех затрат на получение товарной продукции при нулевой рентабельности производства.

3.1.1 КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ ПО СТЕПЕНИ РАЗВЕДАННОСТИ

Все подлежащие учету запасы полезных ископаемых должны быть подсчитаны по категориям разведанности в соответствии с принятой классификацией запасов месторождений и прогнозных ресурсов полезных ископаемых.

В зависимости от степени разведанности месторождений, изученности качества сырья и горнотехнических условий разработки запасы разделяются на четыре категории: **A, B, C₁, C₂**. Они подсчитываются в контурах рудных тел, месторождений и участков. Для выяснения потенциальных возможностей рудных зон, полей, районов и бассейнов на основе общих геологических представлений, кроме того, выделяют так называемые прогнозные запасы.

Категория запасов в подсчетном блоке определяется следующими условиями.

Категория A. Запасы подсчитываются в контуре разведочных выработок. Разведанность блока обеспечивает:

- полное выяснение условий залегания, формы и строения тела полезного ископаемого;
- выделение и оконтуривание природных типов и промышленных сортов сырья, рудных столбов, некондиционных и безрудных участков внутри тела полезного ископаемого;

- полное выяснение качества и технологических свойств сырья;
- полное выяснение горнотехнических условий разработки месторождения.

Категория В. Запасы подсчитываются в контуре разведочных выработок с включением ограниченной зоны экстраполяции при простом залегании, малой изменчивости залежи и качества сырья или надежно установленной их закономерной изменчивости. При указанных условиях допустима также подвеска запасов категории **В** к блокам с запасами категории **А**. Степень разведанности обеспечивает:

- выяснение особенностей условий залегания, формы и строения рудных тел;
- выявление рудных столбов, безрудных и некондиционных участков внутри рудного тела, природных типов и промышленных сортов сырья, а также определения закономерностей их распределения и пространственного соотношения, без точного их оконтуривания;
- выяснение качества и основных технологических свойств полезного ископаемого и основных горнотехнических условий его разработки.

Категории C_1 и C_2 . Запасы подсчитываются в контурах блоков, построенных на основании широкой интерполяции и экстраполяции данных разведочных выработок.

В зарубежной практике оценки месторождений в настоящее время применяется несколько различных систем классификации ресурсов и запасов. Для сближения позиций национальных систем в ООН была разработана так называемая рамочная классификация запасов для учёта степени освоения месторождений. Схематически она представляется в виде набора индексированных элементов в координатной системе с тремя осями изученности, как это представлено на Рис.3.1. По ряду позиций эта классификация запасов пересекается с российской классификацией запасов твёрдых полезных ископаемых, поэтому при необходимости можно найти соответствующую группу индексов рамочных запасов по осям геологической, технологической и экономической изученности месторождения.

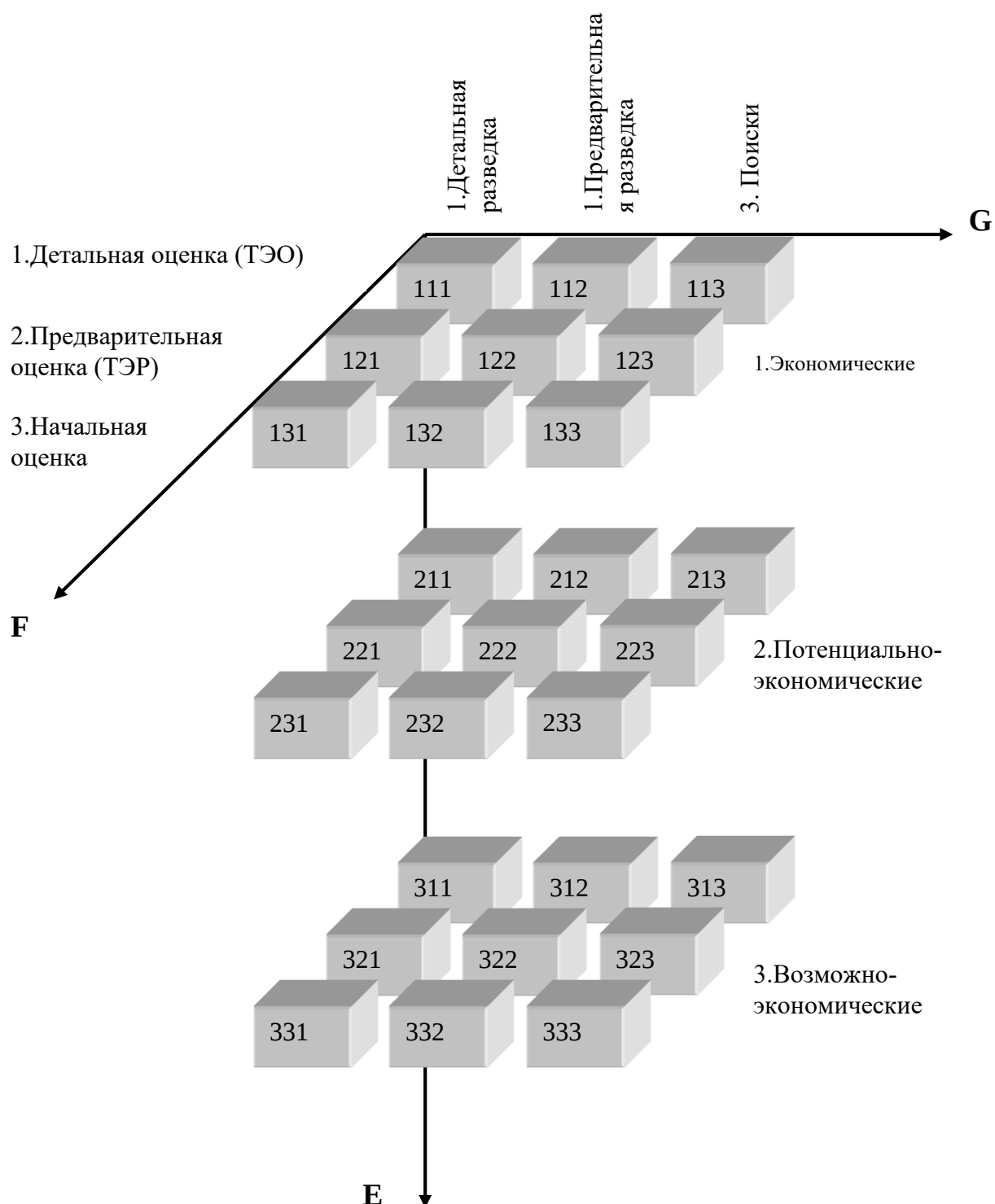


Рис.3.1. Международная рамочная классификация запасов/ресурсов ООН. G - ось геологической изученности; F - ось технологической изученности; E – ось экономической изученности.

В США, Австралии и ЕЭС применяется иная классификация запасов, предписывающая порядок экспертизы, содержание геологических отчётов и оценки минеральных ресурсов и промышленных запасов руд. Последняя редакция классификации опубликована в нормативных документах и ряд экспертов предлагает принять её в качестве международной. Идентифицированные минеральные ресурсы в

этой классификации, в частности, подразделяются, на предполагаемые (inferred), установленные (indicated) и измеренные (measured), а запасы - как вероятные (probable) и достоверные (proved). Соответствие западной и российской систем классификации может быть установлено примерно в соответствии со схемой, представленной на Рис. 3.2.

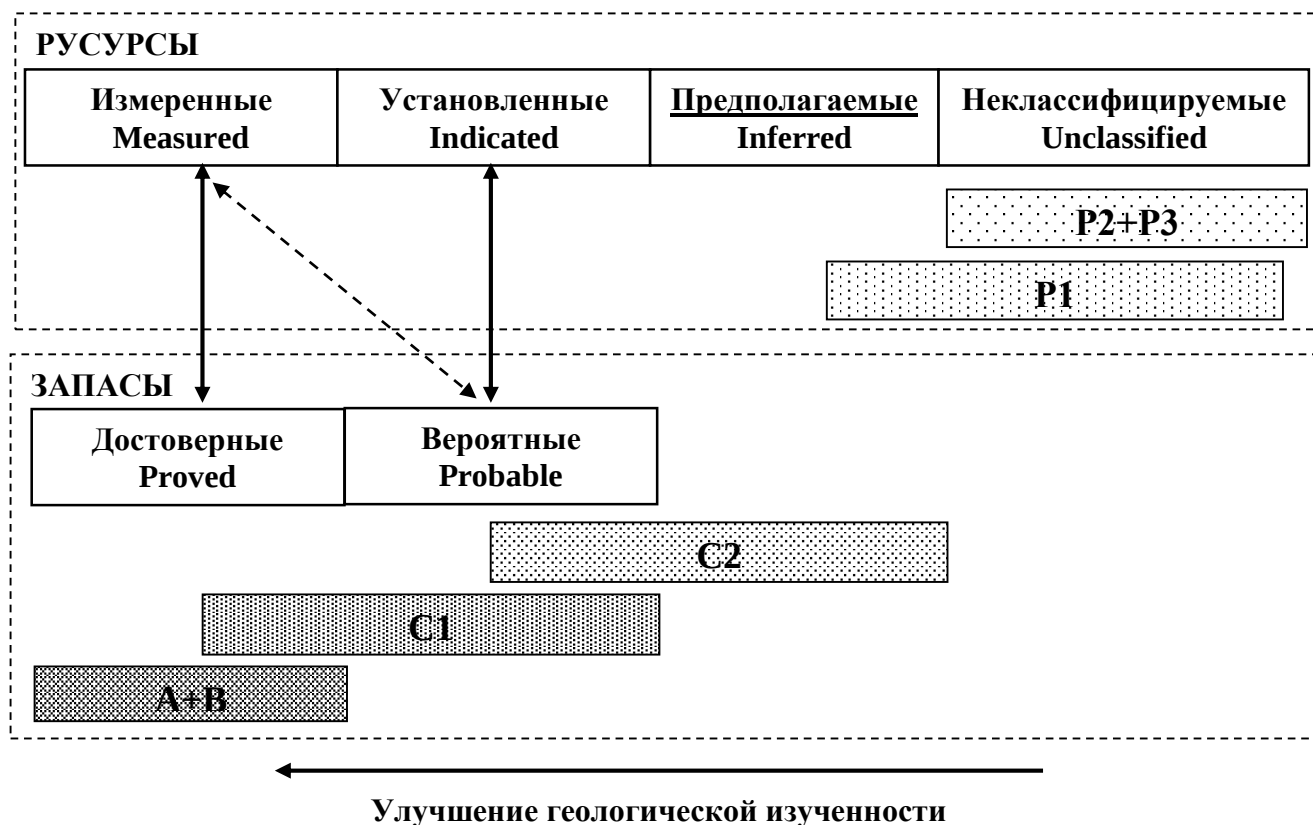


Рис. 3.2. Сопоставление российской и западной классификации ресурсов и запасов

Для перевода полезных ископаемых из ресурсов в запасы согласно западной классификации требуется учесть ряд горно-металлургических, экономических, маркетинговых, законодательных, социальных и правительственных факторов. В результате проведения детального геологического изучения при составлении ТЭО (feasibility study) и затем при эксплуатации месторождения ранее установленные (indicated) и измеренные (measured) прогнозные минеральные ресурсы переводятся в вероятные (probable) и достоверные (proved) запасы, которые частично соответствуют российским категориям запасов С, В и А. Необходимость знания российскими специалистами западной классификации обусловлена тем, что практически все коммерческие программные системы горно-геологического моделирования ориентированы на экспертов, применяющих именно эту классификацию ресурсов и запасов.

3.2 ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ ПО МОДЕЛЯМ

Подсчет запасов руды и содержания алмазов производится на стадиях оценки, разведки и эксплуатационной разведки месторождения (геологических блоков) для определения их промышленной ценности, проектирования и планирования горно-геологических работ. В любом случае, точность оценки влияет на методы извлечения, способы добычи руды и экономическую эффективность отработки месторождения в целом. Геостатистический способ — один из методов, применяемый на

месторождениях с весьма неравномерным распределением полезного компонента, в частности алмазов. При создании трехмерной модели месторождения учитывается практически вся исходная информация о геологическом строении, результатах опробования, физико-механических свойствах пород и кимберлитов, геометрии рудного тела, вмещающих и перекрывающих породах и т.д.

Применение математических методов и наличие исходных данных позволяет рассчитать распределение содержаний алмазов в пространстве рудного тела, значение плотности и объемного веса в каждой элементарной ячейке с учетом их изменчивости в пределах каждого геологического блока. Таким образом, элементарная ячейка модели несет в себе следующую информацию:

- координаты X, Y, Z;
- кодировку типа пород;
- номер геологического блока;
- содержание алмазов;
- необходимые характеристики (плотность, пористость, битуминозность, крепость и т.п.).

Дальнейшие расчеты проводятся по следующей методике:

- определение объемов каждой элементарной ячейки;
- определение среднего содержания алмазов с учетом весов объемов элементарных ячеек;
- определение тоннажа каждой элементарной ячейки;
- определение общего тоннажа геологического блока.

В результате расчетов уточняются параметры геометризаци блока (подсчитанные достаточно точно, независимо от сложности формы геологического объекта), изменчивость объемного веса и содержания алмазов в пространстве рудного тела [45].

Одним из преимуществ при подсчете запасов месторождения, с применением компьютерных технологий, является возможность учета изменчивости объемного веса и содержаний алмазов в пространстве рудного тела [46]. Пример влияния изменчивости на подсчет запасов приведен на одном из геологических блоков достаточно простой морфологии (Таблица 3.1). Выбор простого морфологического строения блока определен необходимостью в данном случае, чтобы избежать влияния геометрии на подсчет запасов.

Таблица 3.1. Влияния изменчивости параметров месторождения на подсчет запасов

Параметры	Ед. изм.	Скважины	Модель	Результаты эксплуатации
Среднее содержание	кар/т	5.492	5.535	5.536
Объемный вес	г/см ³	2.256	2.259	2.259
Объем блока	тыс.м ³	2880.15	2880.3	2880.2
	тыс.т	6497.62	6506.6	6506.37
Запасы	тыс.карат	35684.92	36014.03	36019.27

Как видно из представленной таблицы, уточнены запасы геологического блока. Расчеты по объемному весу и общему содержанию алмазов проводились с применением метода кригинг.

Определение влияния геометрических параметров месторождения (геологического блока) на точность оценки запасов приведен на примере рудного тела с достаточно сложной конфигурацией.

Сечения рудных тел были получены как результат сечения каркасной модели на заданных горизонтах. Каркасная модель создавалась на основе существующих на данный момент периметров рудных тел. Для подсчета объемов руды в пределах заданных горизонтов использованы два метода:

- по каркасным моделям
- по средней площади

Результаты представлены в табличном виде (Таблица 3.2).

Таблица 3.2. Сравнение методов подсчета объемов руды

№ блока	Объем по каркасной модели, м ³	Объем по средней площади, м ³	Разница между методами подсчета объемов, м ³	Разница в %	Фактический объем отработанной руды, м ³
1	516744	517450	-706	0,14	516750
2	1102360	1133940	-31580	2,78	1102500
3	966200	927720	38405	4,14	966125
4	2585229	2579110	6119	0,23	2585100

Разница в подсчете объемов может достигать в отдельных случаях 10-20%, что имеет существенное влияние при расчетах технико-экономической эффективности обработки месторождения и планирования горно-геологических работ.

Применение методов имитационного моделирования позволяет определить погрешность геометрии геологического блока в зависимости от выбранной сети наблюдения и количества скважин, участвующих в расчетах. Подобные расчеты апробированы при подсчете запасов трубки «Ботуобинская», трубки «Нюрбинская» и трубки «Камачия».

3.3 МЕТОД СРЕДНЕГО АРИФМЕТИЧЕСКОГО

Подсчёт запасов по методу среднего арифметического имеет несколько разновидностей, из которых основными являются *суммарный, геологических и эксплуатационных* блоков. В суммарном методе блоком считается вся залежь внутри подсчётного контура. Формулы для подсчёта запасов для указанных разновидностей имеют следующий общий вид.

Среднюю *мощность руды M* в подсчётном блоке определяют как среднее арифметическое из мощностей по всем пересекшим его выработкам по формуле

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.1)$$

где m_i – суммарные мощности по отдельным выработкам; n - количество выработок, пересекших блок и участвующих в подсчете запасов.

Среднее *содержание компонента C* в подсчётном блоке определяют так же в виде среднего арифметического по замерам содержаний в отдельных выработках по формуле:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (3.2)$$

где c_i - среднее содержание компонента в отдельных выработках или скважинах, участвующих в подсчете;

Если каждой выработкой или скважиной вскрыто несколько разделенных породой рудных участков с разным содержанием компонента, то после выделения кондиционных рудных интервалов среднее *содержание компонента* вычисляется по формуле средневзвешенного среднего:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i c_i / L \quad (3.3)$$

где L – суммарная мощность или длина всех рудных интервалов в подсчётном контуре или блоке, которая определяется по формуле

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k l_{ij} \quad (3.4)$$

где l – отдельный рудный интервал; k – количество рудных интервалов в выработке; n – количество разведочных выработок или скважин.

Далее находят.

Площадь S блока в пределах подсчетного контура, плоского полигона:

$$S = 0.5 \sum_{i=1}^n y_i (x_{i+1} - x_{i-1}) \quad (3.5)$$

где сумма вычисляется для всех n вершин подсчётного контура с текущими координатами (x_i, y_i) , при этом для первого слагаемого $x_{1-1} = x_0$ – это x координата последней вершины полигона, а для последнего слагаемого x_{n+1} – это x координата первой вершины.

Объем V блока:

$$V = SM \quad (3.6)$$

Запасы Q полезного ископаемого:

$$Q = SM\gamma, \quad (3.7)$$

где γ – плотность полезного ископаемого.

Запасы P компонента:

$$P = kQC \quad (3.8)$$

где C может быть выражено как в процентах, так и в граммах на тонну. Если C даётся в процентах, то $k = 0.01$, если C в граммах на тонну, как при подсчёте запасов благородных металлов, то $k = 0.001$.

3.3.1 СУММАРНЫЙ МЕТОД

При подсчете запасов суммарным среднеарифметическим методом вся залежь месторождения рассматривается как один подсчётный блок. Тело залежи полезного ископаемого, ограниченное со всех сторон поверхностью его раздела с вмещающими породами, трансформируются в равновеликую по объему многогранную призму, площадь которой равна площади залежи в пределах подсчетного контура, а толщина соответствует средней мощности залежи. Схема такого преобразования представлена на Рис. 3.3.

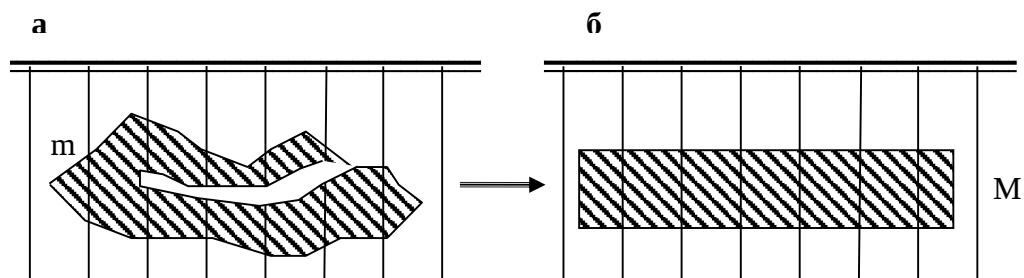


Рис. 3.3. Преобразование рудного тела в многогранную призму при подсчёте запасов суммарным методом среднего арифметического

Основные параметры запасов – среднюю мощность залежи и среднее содержание компонентов – находят как среднеарифметические значения из ряда определений их значений в отдельных пересечениях залежи. Общее выражение запасов для залежи в пределах подсчетного контура определяют по вышеприведённым формулам.

Когда полезное ископаемое приконтурной полосы резко отличается по мощности, содержанию компонентов или по другим показателям от полезного ископаемого основной части залежи, то в этой полосе запасы подсчитывают отдельно. В этом

случае, кроме внешнего контура залежи, проводят внутренний контур, через крайние выработки, пересекающие залежь и показавшие значение мощности залежи и содержание компонента не ниже установленных кондиций с минимумом по мощности рудных прослоев и содержанию ценных компонентов.

Запасы в пределах внутреннего контура определяют отдельно по приведенным выше формулам. В половине межконтурной полосы, прилегающей к внутреннему контуру, запасы определяют по тем же данным, что и для основной части залежи. Эти запасы относят по степени разведанности и изученности на одну категорию ниже, чем запасы в пределах внутреннего контура. Запасы второй половины межконтурной полосы, прилегающей к внешнему контуру, определяют по минимальным данным, принятым при проведении внешнего контура. Эти запасы также относят по степени разведанности и изученности на категорию ниже запасов основной залежи в пределах внутреннего контура.

Суммарный среднеарифметический метод может применяться при любых формах и размерах залежей и условиях их залегания, при любом распределении минерализации и любой системе разведки. Однако его применяют главным образом для получения предварительных данных об общих запасах залежи, а также для проверки подсчетов, сделанных другими методами. Метод дает достаточно точные результаты, когда число разведочных пересечений, на основании которых подсчитываются запасы, не менее 20 - 25 при любом размещении этих пересечений с более или менее равномерным их распределением по залежи и при любой изменчивости мощностей залежи и содержаний компонентов. При малой изменчивости содержаний компонентов и мощностей залежи число разведочных пересечений может быть и меньшим.

Компьютерная реализация. Исходная база данных (БД) включает: таблицу записей проб в разведочных пересечениях (скважины, борозды, шурфы) и заданный контур подсчета запасов. Например, при разведке скважинами необходимо иметь модель данных: DHOLES с координатами интервалов опробования и модель данных POLYGONS с координатами вершин подсчетного контура. Последовательность операций подсчета запасов следующая:

1. Выполняется логическая операция пересечения двух множеств - моделей DHOLES и POLYGONS. Из БД выделяются только те скважины, которые попадают в подсчетный контур;
2. В массиве внутриконтурных скважин DHOLES определяются среднеарифметические значения мощности и содержания с учетом установленных кондиций. В результате этой процедуры на выходе формируется модель точек POINTS для устьев скважин с вычисленными для них средними значениями и линейными запасами ценных компонентов;
3. Выполняется логическая операция объединения двух множеств – модели данных POLYGONS с моделью точек POINTS. Результатом работы данной процедуры становится модель POLYGONS с добавленными в таблицу полями атрибутов и их значений - площади, объема, средней мощности, среднего содержания компонентов, запасов полезного ископаемого и ценного компонента в контуре.
4. Составляется отчет о количестве и качестве запасов согласно требуемому формуляру и выводится на экран или на печать.

Описанная последовательность шагов выполняется в большинстве интегрированных горно-геологических программ в автоматизированном режиме, достаточно указать лишь файл исходной базы данных опробования и файл контура или ввести подсчетный контур интерактивно на экране курсором мыши.

Достоинством суммарного среднеарифметического метода является простота вычислительных операций. Недостаток метода весьма существен и заключается в том, что при таком подсчете запасов не вскрывается характер распределения компонентов,

отдельных сортов и в целом невозможна дифференциация запасов полезного ископаемого.

3.3.2 МЕТОД ГЕОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ

Метод геологических блоков, впервые описанный В.И.Смирновым является наиболее распространённым и наименее трудоёмким. Суммарный среднеарифметический метод является частным случаем данного метода. В этом методе залежь полезного ископаемого в пределах подсчётного контура делят на отдельные геологические блоки по признакам:

- 1) различной степени разведанности и изученности, по густоте разведочных пересечений, детальности опробования и т.п.;
- 2) разных сортов полезного ископаемого, отличающихся различной технологией обработки или использования;
- 3) разных сроков отработки, горизонтов, участков, в каждом из которых возможна особая система отработки.

При таком делении залежи последняя как бы трансформируется в ряд сомкнутых многогранных призм, охваченных общим контуром залежи, в пределах которого подсчитывают запас (Рис. 3.4). Толщина каждой многогранной призмы соответствует средней мощности залежи на этих участках.

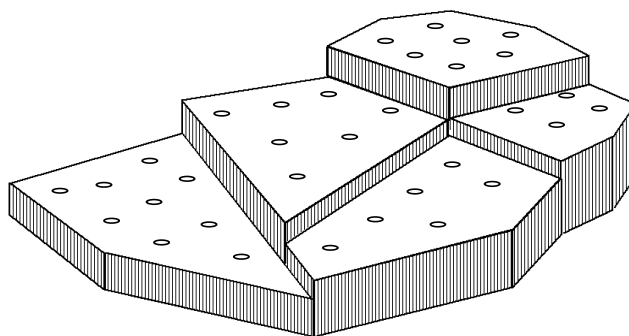


Рис. 3.4. Группа многогранных призм при подсчете запасов методом геологических блоков (по В.И.Смирнову)

Объем залежи, запас полезного ископаемого и компонента в каждом блоке подсчитывают по вышеприведенным формулам. Суммированием запасов по блокам получают общие запасы по залежи в пределах общего подсчетного контура.

Компьютерная реализация данного метода практически ничем не отличается от таковой для описанного выше суммарного способа, за исключением того, что вместо одного контура в модели данных POLYGONS необходимо иметь все контуры полигонов геологических блоков. Контуры также могут вводиться интерактивно оператором на экране компьютера. Отчёт согласно формуляру метода геологических блоков будет представлен таблицей с результатами подсчёта по отдельным блокам и в целом по всему месторождению. В нём выводятся такие показатели как: площадь, средняя мощность, объём рудного тела, средняя плотность, запасы руды, среднее содержание ценного компонента и запасы ценного компонента или металла.

При данном варианте способа среднего арифметического необходимо, чтобы в каждом блоке было не менее 15 отдельных замеров мощности залежи и отдельных проб для месторождений с равномерным и весьма равномерным характером распределения минерализации и не менее 25 - для прочих месторождений с более неравномерным характером распределения минерализации.

Ошибки в запасах отдельных блоков могут достигать при этом значительных размеров и будут тем больше, чем неравномернее характер распределения минерализации, но при случайном характере этих ошибок, суммарные запасы по всем

блокам будут определены со значительно меньшими ошибками, чем ошибки запасов отдельных блоков. При достаточно большом числе блоков, более 10, суммарные запасы получаются с достаточной для практических целей точностью, не меньшей, чем при других способах подсчета запасов.

3.3.3 МЕТОД ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ БЛОКОВ

Этот метод как разновидность среднего арифметического наиболее распространён при подсчёте запасов жильных или маломощных пластовых месторождений, когда разведка месторождения производится в основном горными работами или когда на месторождении уже проведены горноподготовительные выработки (штреки, восстающие и др.). Подсчет запасов путём усреднения и суммирования производят для каждого эксплуатационного блока, оконтуренного с четырех или менее сторон горноподготовительными выработками.

Традиционно исходным документом для подсчета запасов методом эксплуатационных блоков служил маркшейдерский план выработок или их проекции на вертикальную или наклонную плоскость. В последнем случае плоскость проекции проводили параллельно средней линии простирания и средней линии падения залежи. В качестве иллюстрации применения метода на Рис. 3.5 приведен план горных работ по одному из эксплуатационных блоков месторождения цветных металлов [84].

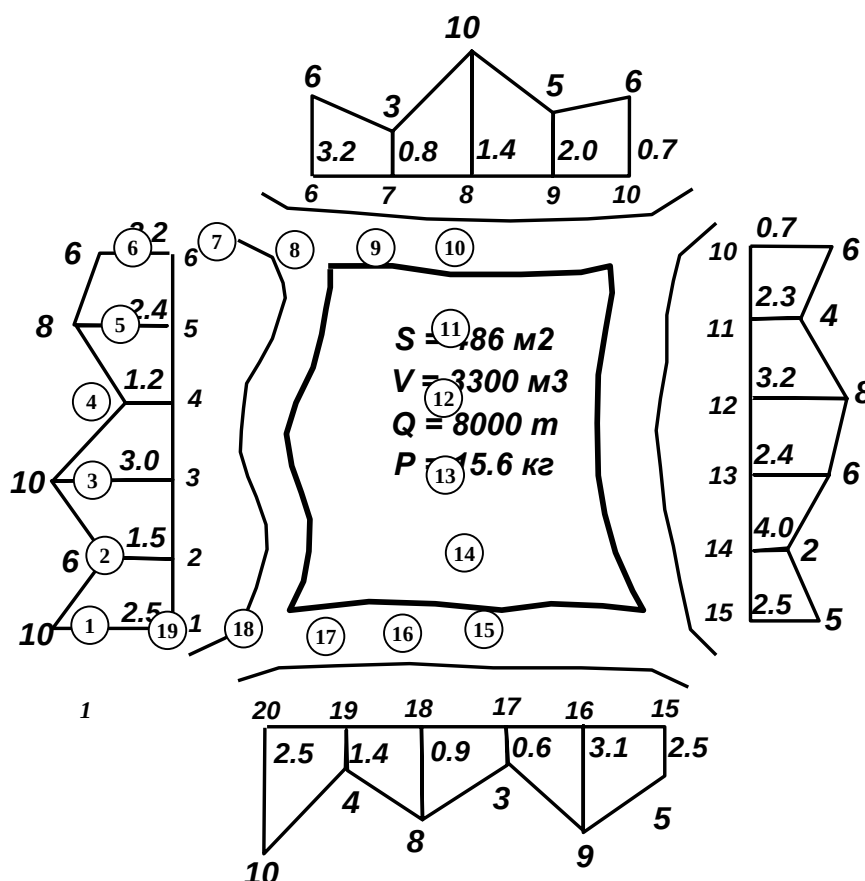


Рис. 3.5. К подсчёту запасов по методу эксплуатационных блоков

В данном примере точки опробования, показанные цифрами в кружках, расположены через одинаковые интервалы и в них замерялась мощность руды m и определялось содержание s компонента. Подсчёт запасов производят по приведенным выше формулам в следующем порядке, определяя:

1. Площадь блока, $S = 486 \text{ м}^2$.
2. Среднюю мощность руды по блоку, $M = 6.8$.
3. Объем полезного ископаемого по блоку, $V = 486 \times 6.8 = 3300 \text{ м}^3$.

4. Запас руды блока (тоннаж), $Q = 3300 \times 2.42 = 8000\text{т.}$
5. Среднее содержание полезного компонента по блоку как среднее взвешенное по мощности, $C = 1.95\text{г.}$
6. Запас полезного компонента по блоку, $P = 8000 \times 1.95 = 15.6 \text{ кг.}$

Среднее значение плотности полезного ископаемого γ также определяют как среднее арифметическое из нескольких его определений опытной вырубкой или лабораторным определением.

Компьютерная реализация. Поскольку данный метод по существу представляет собой метод среднего арифметического, то последовательность операций компьютерного подсчёта запасов практически не отличается от последовательности для суммарного метода. Однако в данной разновидности среднеарифметического метода необходимо учитывать, что основные точки опробования должны лежать на контурах смежных эксплуатационных блоков, а не снаружи, как показано на Рис. 3.5. В этом случае точки опробования попадут при выполнении логических операций с множествами в оба соседних блока и внесут свой вклад в суммарную оценку их показателей. При использовании компьютеров для проведения расчётов по данному методу достаточно иметь базу данных исходной геолого-маркшейдерской информации, а все графические построения могут быть выполнены впоследствии по мере необходимости подготовки материалов к отчёту о запасах или для планирования нарезки эксплуатационных блоков.

Достоинством подсчёта запасов по методу эксплуатационных блоков является то, что он выполняется в пределах существующих горно-добычных участков и может быть без пересчёта использован при планировании и проектировании эксплуатационных работ. Поэтому этот метод применяется в подсчетах, связанных с учетом движения запасов при подземных способах добычи.

Недостатком метода является то, что он применим только при условии вскрытия горными выработками и оконтуривания относительно выдержанных залежей полезных ископаемых. Прерывистые и гнездовые тела могут подсчитываться этим методом с введением коэффициентов рудоносности, что в некоторой степени снижает достоверность подсчёта запасов.

3.4 МЕТОД ТРЕУГОЛЬНИКОВ

В этом методе каждая точка опробования или разведочная выработка (скважина, шурф) соединяется с соседней точкой прямой линией. При использовании компьютерного программного обеспечения этот процесс выполняется в виде процедуры триангуляции множества исходных или опорных точек. В результате этого площадь тела залежи разбивается сетью треугольников. Подсчет запасов методом треугольников заключается в следующем. Обычно на плане триангуляция соединяет у вертикальных разведочных выработок их устья, а у наклонных - точки их входа в полезное ископаемое, причем эти линии не должны пересекаться.

В полосе между внешним и внутренним контуром, в межконтурной полосе, треугольники близки к равнобедренным. Основанием таких треугольников служат линии, проведенные через крайние выработки, пройденные по полезному ископаемому через которые проводят внутренний контур, а вершинами - точки, лежащие на внешнем контуре и равноудаленные от двух других вершин разведочных выработок треугольника (Рис. 3.6).

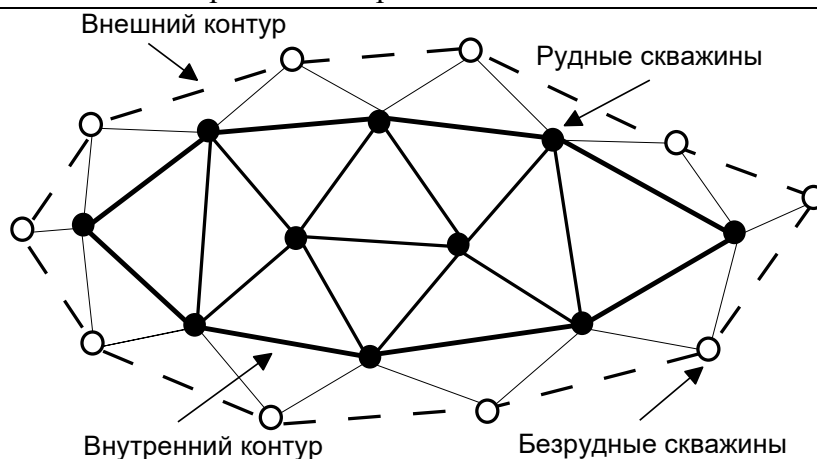


Рис. 3.6. Схема подсчета запасов методом треугольников.

Вся залежь месторождения в пределах подсчётного контура в результате разбивается на трехгранные косоусеченные призмы, общий объем которых равновелик объему залежи полезного ископаемого.

Разбивка площади полезного ископаемого на треугольники может быть произведена двумя вариантами: путём триангуляции Делоне или по триангуляции с бровками или структурными линиями, которые не должны пересекаться ребрами треугольников.

Построенные таким образом трехгранные призмы образуются треугольниками, вершины которых представляют собой точки входа разведочных пересечений, скважин, в залежь для верхнего основания и точки выхода этих же пересечений из залежи для нижнего основания. Боковыми ребрами призм служат: при подсчете объема v_i полезного ископаемого - мощности m полезного ископаемого; при подсчете запаса q_i полезного ископаемого - произведение мощности m на плотность γ ; при подсчете запасов p_i компонента - линейные запасы компонента в виде произведения $m\gamma s$. Объем призмы определяется путём умножения основания на среднюю длину ребра.

В итоговом формуляре объем V полезного ископаемого в целом по месторождению выражается как сумма объемов отдельных призм. Запас Q полезного ископаемого выражается как сумма запасов по отдельным призмам и, наконец, запас компонента P выражается как сумма его запасов по отдельным трехгранным призмам.

Запасы по призмам, расположенным в межконтурном объеме, подсчитывают аналогично подсчету запасов призм, расположенных в пределах внутреннего контура.

Для вершин треугольников межконтурной полосы, расположенных на внешнем контуре, принимают значения мощности и содержания компонента внешнего контура - нулевое или минимальное кондиционное значение в зависимости от того, будет ли внешний контур линией полного выклинивания или он проведен по рабочей мощности или по минимальному кондиционному содержанию компонента.

Компьютерная реализация. По исходным точкам данных опробования скважин строится сеть триангуляции. Предварительно в каждой точке определяется суммарное значение мощности рудных прослоев и среднее значение ценного показателя. Подсчёт запасов получается суммированием значений в треугольных призмах внутри контура подсчёта запасов.

Достоинства и недостатки метода треугольников во многом аналогичны подсчёту запасов по методу многоугольников или по диаграмме Вороного. Считается, что при выборе в качестве вершин триангуляции точек опробования или скважин слишком редкой сети разведки трехгранные призмы не отвечают природным формам полезного ископаемого и не вписываются в эксплуатационные участки. Однако если при триангуляции в качестве структурных линий или бровок использовать оцифрованные контуры геологических объектов и выемочных единиц, которые не должны пересекаться

треугольниками, то вышеприведенный недостаток метода треугольников может быть вполне устранён. При этом точность подсчёта запасов в границах рудных тел и эксплуатационных участков будет соответствовать предъявляемым требованиям.

3.5 МЕТОД МНОГОУГОЛЬНИКОВ

Метод многоугольников, называемый иногда методом ближайшего района, был предложен в 1914 г. профессором А.К.Болдыревым. В математике сеть многоугольников близости известна как диаграмма Вороного или сеть полигонов Дирихле. Двумерная диаграмма Вороного определяет разбиение плоскости на многоугольники, а трехмерная - разбиение пространства на полиэдры. Наиболее важными свойствами диаграммы Вороного являются следующие:

- для каждой точки p_i множества точек S в многоугольнике v_i (для трехмерного случая – в полиэдре) расстояние от любой точки p_{xyz} до p_i меньше, чем до любой другой точки множества S ;
- граф, двойственный диаграмме Вороного, является триангуляцией Делоне множества S .

Сущность метода многоугольников заключается в том, что оконтуренное тело полезного ископаемого разбивают на ряд прямых многогранных призм, запасы которых подсчитывают отдельно для каждой призмы. Общий запас полезного ископаемого и компонента по всей залежи получают суммированием запасов отдельных призм.

Многоугольники Вороного, служащие основанием призм, можно построить вручную без применения компьютера следующим образом:

- 1) каждая точка опробования или разведочная выработка (скважина, шурф) соединяется с ближайшими точками опробования или выработками;
- 2) на середине линий, соединяющих данную точку опробования с ближайшими, восстанавливают перпендикуляры, которые, пересекаясь между собой, образуют многоугольники Вороного.

Любая точка построенного многоугольника Вороного ближе к данной опорной точке, чем к другим; поэтому этот метод назывался иногда методом ближайшего района. В результате такого построения, тело полезного ископаемого как бы преобразуется в группу сомкнутых многогранных призм, основаниями которых являются построенные вышеуказанным способом многоугольники, а высотой - мощности тела по скважинам, как это показано на Рис. 3.7.

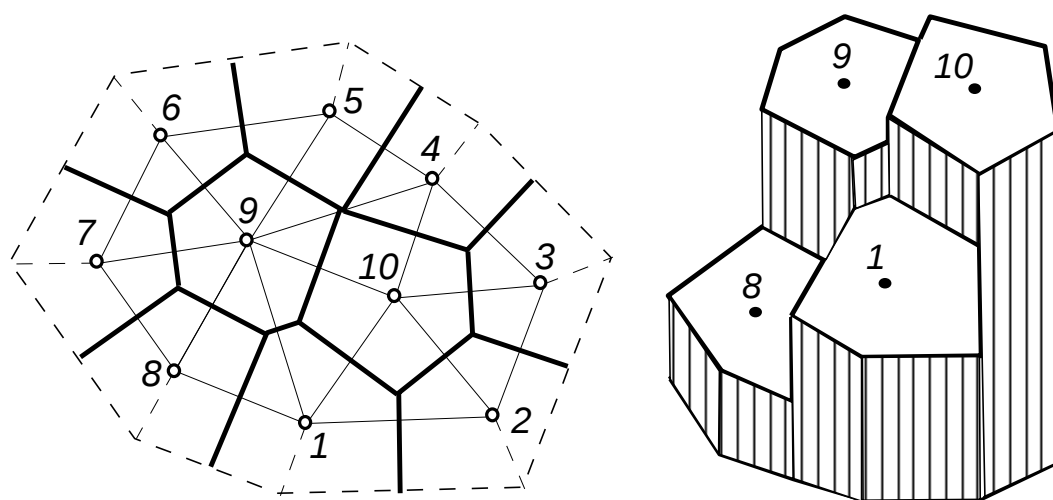


Рис. 3.7. К подсчёту запасов методом многоугольников. а–фрагмент плана; б–перспектива тела фрагмента, трансформированного в группу многогранных призм

Без применения вычислительной техники метод многоугольников является крайне трудоёмким и использовался редко, главным образом, для оценки запасов пластовых и

россыпных месторождений. С помощью компьютеров процесс построения диаграммы Вороного удалось полностью автоматизировать. Вначале выполняется триангуляция Делоне исходных точек данных, а затем строится двойственный ей граф диаграммы Вороного для получения множества многогранных призм.

Последовательность подсчета запасов по методу многоугольников следующая. Вначале определяется объем призмы по формуле:

$$v_i = s_i m_i \quad (3.9)$$

Затем находится запас полезного ископаемого, имеющего плотность γ , в объеме i -й призмы:

$$q_i = v_i \gamma \quad (3.10)$$

Вычисляется запас полезного компонента в объеме призмы по формуле:

$$p_i = q_i c_i \quad (3.11)$$

Общие объем V , запас Q полезного ископаемого и запас P полезного компонента по всей залежи получается суммированием соответствующих частных величин для призм во внутреннем контуре и в межконтурной полосе.

При использовании этого метода выделение внутреннего и внешнего контуров не рекомендуется, так как периферийные многоугольники перекрывают полосу, расположенную между внутренним и внешним контурами подсчета запасов. Если же провести внешний контур, то межконтурная полоса разделится на участки, тяготеющие к выработкам.

Компьютерная реализация метода многоугольников при наличии базы данных разведочных выработок в виде скважин DHOLES и контура подсчета запасов POLYGON_CON выполняется следующим образом.

1. Модель скважинных данных DHOLES интервального опробования залежи преобразуется в модель точек POINTS с координатами устьев скважин. В результате в таблицу атрибутов для каждой скважины записываются суммарная мощность кондиционных рудных прослоев, средние содержания компонентов, средняя плотность и линейные запасы компонентов.
2. Для модели точек POINTS выполняется процедура триангуляции Делоне и по ней строится диаграмма Вороного, которая и является сетью многоугольников близости. Атрибуты точек POINTS приписываются каждому многоугольнику, массив которых сохраняется как модель данных POLYGON_VOR.
3. Выполняется логическая операция объединения подсчетного контура POLYGON_CON с сетью POLYGON_VOR многоугольников Вороного. В результате в таблицу атрибутов подсчетного контура помимо значения площади записываются все показатели подсчета запасов - средняя мощность, объем рудного тела, средняя плотность, запасы руды, среднее содержание ценного компонента и запасы ценного компонента или металла.
4. Составляется отчет о количестве и качестве запасов согласно формуляру и отчет выводится на экран или на печать.

Подсчет по методу многоугольников с применением компьютеров достаточно прост и точен. Он выполняется на основе разбивки площади одним способом, поэтому пересчет запасов производится однозначно при изменении параметров путём суммирования запасов соответствующих призм. Метод применим при наличии достаточно плотной сети разведочных пересечений и значительных колебаниях мощностей, плотностей и содержаний. Основным недостатком метода является то, что сами многоугольники, как правило, не отражают природной морфологии залежи, не увязываются с эксплуатационными участками и зонами деления полезного ископаемого на сорта.

3.6 МЕТОД РАЗРЕЗОВ

Метод разрезов применяется для месторождений, разведанных вертикальными или горизонтальными разведочными линиями, по которым можно построить геологические разрезы этих месторождений. Различают две разновидности рассматриваемого метода: линии разрезов параллельны и линии разрезов непараллельны.

При подсчете методом разрезов предварительно подсчитывают запас в разрезах залежи по разведочным линиям или профилям, мощность по которым принимают равной 1м , а произведение полусуммы запасов в разрезах на расстояние между ними определяет запас в блоках между двумя разрезами. Суммирование запасов по блокам определяет общий запас месторождения (или его разведанной части).

На Рис. 3.9 показаны вертикальный разрез через разведочные выработки, расположенные по параллельным линиям.

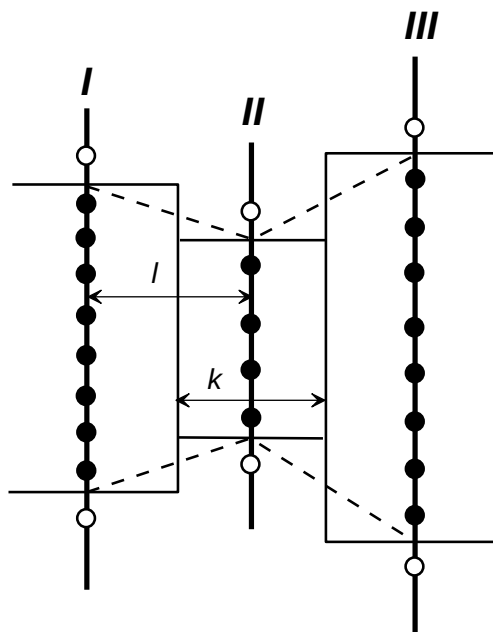


Рис. 3.8. Два варианта подсчета запасов по методу разрезов.

Закрашенные точки – выработки пересекающие тело залежи. Сплошные линии блоков – контуры подсчёта по площади влияния, пунктирные линии – контуры подсчёта по площади между линиями профилей. При построении блоков, опирающихся на две разведочные линии, тело полезного ископаемого преобразуется в ряд сомкнутых параллелепипедов с высотой I , тогда как при построении блоков, опирающихся на одно разведочное сечение, последнее рассматривается как среднее сечение и высота параллелепипедов считается равной k . Применение последнего способа разбивки на подсчётные блоки не рекомендуется для месторождений с неравномерным распределением полезных компонентов. В этом случае количество выработок чаще всего бывает недостаточным для получения надёжных данных о действительном среднем содержании компонентов в блоках.

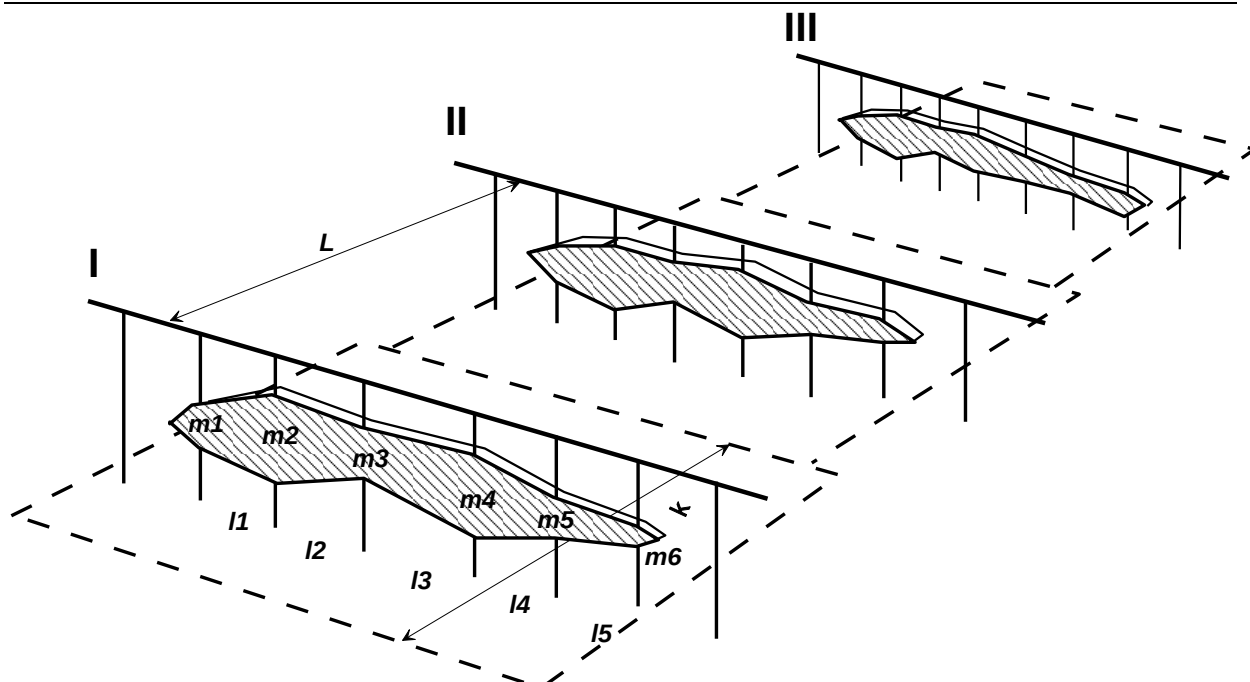


Рис. 3.9. Схема подсчета запасов методом вертикальных параллельных разрезов (по В.И.Смирнову)

3.6.1 ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ РАЗРЕЗЫ

Площадь вертикального разреза полезного ископаемого по линии I профиля определится как сумма площадей трапеций:

$$S_1 = \frac{m_1 + m_2}{2} l_1 + \frac{m_2 + m_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n + m_{n+1}}{2} l_n, \quad (3.12)$$

где

$m_1, m_2, \dots, m_{n+1}$ – мощность по отдельным скважинам;

$l_1, l_2, \dots, l_n$ – расстояния между соседними скважинами.

Запас полезного ископаемого Q в слое разреза I с горизонтальной мощностью 1 м равен:

а) в случае, когда плотность полезного ископаемого γ варьирует в пределах более $\pm 50\%$ от среднего его значения,

$$Q_1 = \frac{m_1 \gamma_1 + m_2 \gamma_2}{2} l_1 + \frac{m_2 \gamma_2 + m_3 \gamma_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n \gamma_n + m_{n+1} \gamma_{n+1}}{2} l_n, \quad (3.13)$$

б) в случае, когда γ – величина постоянная или варьирует в пределах менее $\pm 50\%$ от среднего его значения,

$$Q_1 = \gamma \left(\frac{m_1 + m_2}{2} l_1 + \frac{m_2 + m_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n + m_{n+1}}{2} l_n \right). \quad (3.14)$$

Линейный запас компонента в объеме слоя разреза V_1 по разведочной линии профиля I будет равен:

$$P_1 = k \left(\frac{m_1 \gamma_1 c_1 + m_2 \gamma_2 c_2}{2} l_1 + \frac{m_2 \gamma_2 c_2 + m_3 \gamma_3 c_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n \gamma_n c_n + m_{n+1} \gamma_{n+1} c_{n+1}}{2} l_n \right), \quad (3.15)$$

где

$c_1, c_2, \dots, c_n$ – содержание компонента по скважинам;

k – коэффициент, зависящий от единиц измерения содержания компонента:

а) если c выражено в весовых процентах, то $k = 1/10^2$;

б) если c выражено в граммах на тонну, то $k = 1/10^6$;

Общий объём, запасы полезного ископаемого и полезного компонента для всего месторождения можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} V &= \frac{S_1 + S_2}{2} L_1 + \frac{S_2 + S_3}{2} L_2 + \dots + \frac{S_n + S_{n+1}}{2} L_n, \\ Q &= \frac{Q_1 + Q_2}{2} L_1 + \frac{Q_2 + Q_3}{2} L_2 + \dots + \frac{Q_n + Q_{n+1}}{2} L_n, \\ P &= \frac{P_1 + P_2}{2} L_1 + \frac{P_2 + P_3}{2} L_2 + \dots + \frac{P_n + P_{n+1}}{2} L_n, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где

$L_1, L_2, \dots, L_n$ – расстояния между соседними разрезами.

Если площади параллельных разрезов, ограничивающих блок, по величине отличаются друг от друга более чем на 40%, то вместо формулы призмы для определения объёма блока пользуются формулой усеченной пирамиды:

$$V = \frac{S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}}{3} L \quad (3.17)$$

По приведенным формулам объем и запасы месторождения в целом определяются суммированием по всем разрезам. Объем и запасы межконтурных полос подсчитываются как полусумма площади разреза по внутреннему контуру и площади разреза по внешнему контуру, умноженная на расстояние между ними.

По аналогичным формулам производят подсчет запасов по горизонтальным параллельным разрезам залежи (Рис. 3.10).

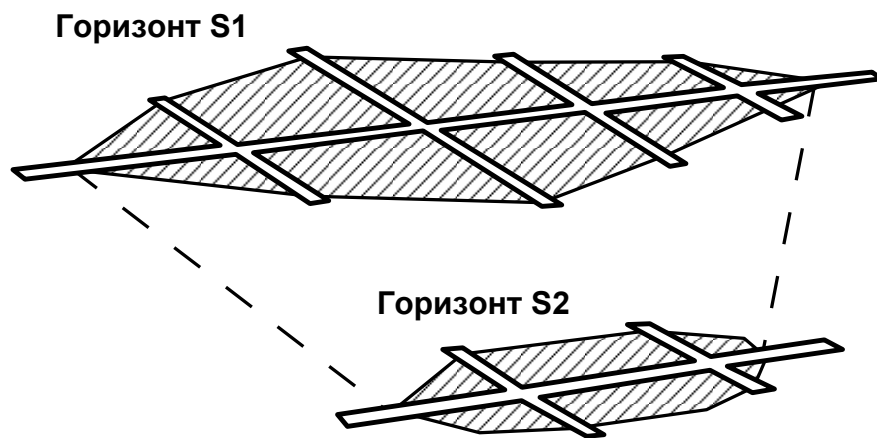


Рис. 3.10. К подсчету запасов методом горизонтальных разрезов

3.6.2 НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ РАЗРЕЗЫ.

Если угол между разведочными линиями превышает 10° , то разрезы принято считать не параллельными. В этом случае запасы полезного ископаемого между двумя непараллельными разведочными линиями профилей I и II можно определить по формуле

$$Q = \frac{\beta}{\sin \beta} \frac{(Q_I + Q_{II})}{2} \frac{(H_I + H_{II})}{2}, \quad (3.18)$$

а объём по формуле

$$V = \frac{\beta}{6} [R_I (2S_I + S_{II}) + R_{II} (2S_{II} + S_I)], \quad (3.19)$$

или при малых углах β , когда $R_I = H_I / \sin \beta$; $R_{II} = H_{II} / \sin \beta$:

$$V = \frac{\beta}{6 \sin \beta} [H_I (2S_I + S_{II}) + H_{II} (2S_{II} + S_I)] \quad (3.20)$$

где

β - угол между разведочными линиями в радианах;

S_I и S_{II} – площади сечений;

R_I и R_{II} – расстояния от центров тяжести площадей разрезов до точки пересечения разведочных линий в вершине угла β ;

H_I и H_{II} - длины перпендикуляров, восстановленных из центров тяжести разрезов I и II на противоположные разведочные линии.

Компьютерная реализация. Исходные данные представлены таблицами базы данных опробования по разведочным пересечениям и внешним контуром подсчёта запасов. Последовательность шагов по подсчёту запасов методом вертикальных или горизонтальных параллельных разрезов следующая:

1. Выполняется операция запроса к базе данных скважин DHOLES для извлечения разведочных пересечений по каждому разрезу или геологическому профилю (поле PROFILE).
2. Для каждого вертикального или горизонтального разреза выполняется автоматическое оконтуривание всех рудных блоков в пределах внешнего подсчётного контура в соответствии с установленными промышленными кондициями. Визуализация на экране компьютера позволяет осуществлять контроль построения полигонов кондиционных руд. Готовые рудные полигоны сохраняются в модели данных POLYGONS, состоящей из массива вершин по контактам между рудой и породой в пробах или литологическим границам в скважинах.
3. Шаги 1 и 2 повторяются для всех разрезов вдоль разведочных профилей и новыми полигоны рудных тел заносятся в таблицу базы данных POLYGONS.
4. Выполняется операция пересечения полученной модели контуров рудных блоков на разрезах POLYGONS с моделью скважин DHOLES. В процессе пересечения для каждого контура рассчитывается средневзвешенное среднее значение содержания ценного компонента и запас руды в слое толщиной один метр.
5. Вычисляются запасы для всего месторождения по формулам для метода разрезов.
6. Полигоны на разрезах POLYGONS объединяются в общую каркасную модель тела залежи SOLID, поверхность которой разбивается на треугольники. Определяется средневзвешенное значение содержания компонента и величина запасов руды в залежи. Для проверки проводится сопоставление с данными, полученными в п.5.
7. Данные выводятся в отчёт

Итоговая геометрия залежи визуализируется на экране компьютера в виде каркасного тела, которое может быть теперь представлено в виде блок диаграмм по произвольным вертикальным или горизонтальным разрезам.

3.7 МЕТОД ОСАЖДЕНИЯ СЛИТКА ИЛИ ОБЪЁМНОЙ ПАЛЕТКИ

Суть метода осаждения или прессования слитка состоит в следующем. Рудное тело, ограниченное со стороны висячего и лежащего бока сложными поверхностями, в контуре подсчета запасов преобразуется в равновеликое по объему тело, ограниченное с одной стороны плоскостью основания, а с другой — сложной поверхностью

накопленной массы. Таким образом, рудное тело как бы осаждается на плоскость в виде слитка (Рис. 3.11).

Для определения объема тела полезного ископаемого методом осаждения при традиционном ручном способе строится его план в изолиниях мощности. Интерполяция данных геологической съемки и разведочных выработок выполняется с использованием, по возможности, геофизических данных. При определении объема такого тела применяется способ объемной палетки проф. Соболевского. Способ объемной палетки состоит в том, что на план тела в изомощностях при произвольной ориентировке накладывается палетка из прозрачной бумаги с нанесенной на ней сеткой квадратов со стороной квадрата, например, 1 см. Для центра каждой клетки по плану определяется средняя мощность рудопроявления в виде отметки z_i . Затем простым суммированием находят значение $\sum_{i=1}^N z_i$, которое после умножения на основание палетки в масштабе

плана даёт искомый объём залежи. Объем тела определяется как минимум при двух положениях палетки и при допустимых расхождениях в 1-2% вычисляется среднее значение. Переход от объема к массе полезного ископаемого производится, как обычно, умножением объёма на среднюю плотность руды. Далее масса компонента рассчитывается как произведение массы полезного ископаемого на среднее содержание в нём ценного компонента.

Применение компьютеров позволяет полностью заменить операцию наложения палетки на план в изолиниях прямым суммированием запасов в ячейках или столбиках двумерной грит модели месторождения. Собственно для подсчёта запасов нет надобности строить изолинии. Расчёты объёма и массы выполняются непосредственно по ячейкам блочной модели, треугольным призмам или полигональным оболочкам отдельных рудных тел. Однако карты изомощностей и содержаний необходимы для иллюстрации интерполяции соответствующих геологических показателей и представления их в виде системы изолиний в отчетной геолого-маркшейдерской документации.

Значения в ячейках двумерной решетки 2D GRID модели осаждения можно представлять не для мощностей и содержаний, а дополнительно - для произведений мощности и плотности или мощности, плотности и содержания и сразу получать данные в массовом выражении руды или ценного компонента.

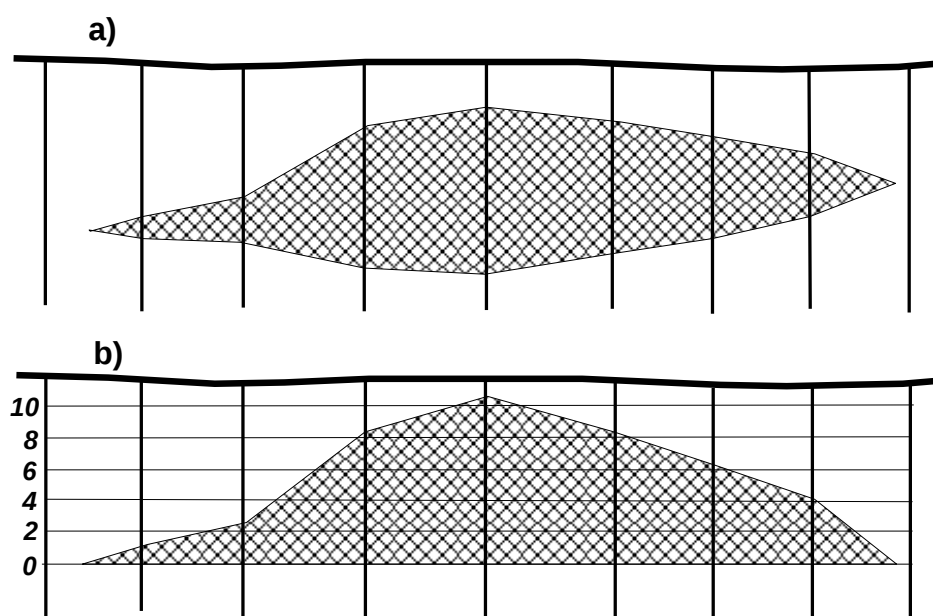


Рис. 3.11. К подсчёту запасов методом осаждения: а) разрез рудного тела с разведочными выработками; б) разрез равновеликого тела, осаждённого на плоскость с отметкой максимальной глубины залежи.

Компьютерная реализация. Исходные данные также и как в методах среднего арифметического включают: базу данных опробования по разведочным пересечениям и контур подсчёта запасов. Последовательность шагов следующая:

1. Выполняется операция с множествами по пересечению модели данных скважин и модели данных подсчётного контура.
2. По скважинам подсчитываются суммы по рудным интервалам и вычисляются линейные запасы.
3. Генерируется решетка двумерных прямоугольных блоков
4. Выполняется интерполяция показателей
5. Суммируются значения в узлах решетки для подсчёта запасов
6. Данные выводятся в отчёт

Для отчета подготавливается карта в изолиниях.

Подсчет запасов методом осаждения слитка и обработки изолиний объёмной палеткой ранее широко применялся при подсчёте запасов железных руд, россыпных месторождений золота, угля, месторождений огнеупорных глин, известняков и др. Затем метод стал применяться редко.

Недостатки метода: 1) трудность применения на месторождениях с пострудными нарушениями сплошности тела, так как он основан на прямой интерполяции разведочных данных; 2) сложность выделения большого числа участков блоков по степени разведанности и сортам сырья. Метод ограничен в своем применении в основном месторождениями крупных ненарушенных и детально разведанных тел. Он малопригоден для подсчета запасов по данным предварительной разведки по редкой сети, так как при этом имеется слишком мало данных для построения изолиний путем интерполяции между далеко расположенными друг от друга выработками. Изолинии в этом случае плохо отражают формы тела и строение деталей. Кроме того, этот метод неприменим для небольших месторождений, например гнездовых, а также месторождений, разбитых сбросами и со слабо выраженным изменением мощности и равномерным распределением компонентов.

Преимущество метода состоит в том, что он дает наглядную, хотя и преобразованную, картину изменения мощности залежи и содержания полезного ископаемого. Это важно для проектирования открытых разработок, когда кроме плана залежи в изолиниях мощности необходим еще план в изолиниях коэффициента вскрыши и гипсометрические планы кровли и почвы залежи. Метод осаждения слитка рекомендуется использовать для оперативного подсчета запасов однокомпонентного сырья, залегающего линзообразно, например, для некоторых типов месторождений песчано-гравийного материала, бурых углей, железных руд, бокситов, россыпей и других ископаемых, особенно разрабатываемых открытым способом.

3.8 СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД

При данном методе по результатам разведочных работ или эксплуатации месторождения определяют количество выхода полезного компонента на единицу площади или объема минерального сырья, называемого продуктивностью месторождения. Для подсчета запасов эту величину распространяют на всю продуктивную площадь или объем тела полезного ископаемого.

Метод часто применяют для ориентировочного определения запасов. Им можно пользоваться также для предварительной оценки запасов полезных компонентов при крайне неравномерном их распределении (например, горного хрусталя, слюды, некоторых месторождений урана). Кроме того, статистическим методом подсчитывались запасы фосфоритов и железных руд пластовых месторождений. Наконец, этот метод применяется для оценки запасов крупных региональных территорий - районов, бассейнов - по данным выхода полезного ископаемого при

отработке данных, полученным по площади, например, с помощью аэрогеофизических или спутниковых методов измерений.

Статистический метод скорее можно рассматривать как метод определения запасов товарной части полезного компонента. Действительно, зная, например, общую площадь распространения сырой руды и выход ее с 1 м^2 , можно подсчитать общие запасы фактически обогащенной руды или полезного компонента, которые могут быть получены после их извлечения. Но, кроме общих цифр запасов концентрата, для целей проектирования и эксплуатации месторождения необходимо знать и общие запасы минерального сырья, которые подлежат выемке и обогащению. Поэтому при статистическом методе, наряду с подсчетом запасов концентрата, подсчитываются запасы и общей массы минерального сырья.

Практическая реализация. По разведочным или эксплуатационным выработкам определяют выход сырья на единицу площади или объема рудного тела. Полученные показатели продуктивности распространяют на установленную или предполагаемую площадь оруденения. Продуктивность определяется на всю мощность оруденения или на 1 м углубки. При выводе средней продуктивности для блоков месторождения или района по геологическим соображениям иногда вводятся поправочные коэффициенты. Таким образом, сущность метода - определение продуктивности оруденения и площади, на которую ее следует распространить. Количество сырья в подсчетном блоке определяется по формуле $P = Sp$, где S - площадь блока в метрах, p - продуктивность оруденения в килограммах или тоннах на 1 м^2 .

Статистический метод применяется для подсчета запасов сырья с неравномерным распределением по площади и мощности залежи: пьезокварца, исландского шпата, некоторых типов месторождений слюды, валунного строительного материала, валунных железных руд, желваковых фосфоритов и т.д. Метод подсчета запасов по продуктивности широко применяется при подсчете прогнозных запасов

3.9 СТОХАСТИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИЯ

Основным различием между оценочными методами (полигональный, все виды Кригинга) и стохастической имитацией геологического строения является характер получения значений содержаний в точках между известными пробами. В оценочных методах основное значение придается моделированию непрерывности распределения содержаний тогда как при симуляции сохраняется статистическая и пространственная вариация базы данных в любом масштабе.

В отличие от любого вида кригинга целью имитации является получение серии равновероятностных значений, называемых реализациями или образами рудного тела. Эти образы характеризуют статистическую и пространственную изменчивость рудного тела или месторождения. Условное моделирование или симуляция является специфическим методом при котором реальные пробы (точнее их местоположение и содержание) используются при создании различных образов. В этом смысле модель обусловлена исходными данными, т.е. является зависящей от состояния в известных зонах опробования.

В отличие от оценочных методов, результатом которых является одно значение оценки содержания в блоке, результатом условной симуляции является целый набор возможных значений, представленных в виде функции условного распределения. Путем комбинации набора симулированных моделей определяется вероятностное значение содержания в каждой отдельно взятой точке. Таким образом, имитационные модели имитируют реальные закономерности распределения содержаний.

3.10 МЕТОД РЕГУЛЯРНЫХ БЛОКОВ

При подсчете запасов методом регулярных блоков все пространство месторождения предварительно разбивается на ячейки заданного размера – блоки. В ряде программ

геологического моделирования ячейки могут быть дополнительно разбиты на более мелкие «парсели», что позволяет более точно моделировать рудные тела по границам контактов руды с пустой породой. В целом, однако, при современной вычислительной мощности компьютеров, практически всегда может быть построена достаточно детальная однородная регулярная модель залежи с размером блоков удовлетворяющем предъявляемым требованиям. Кроме того, при необходимости на более разведанных участках месторождения всегда можно построить локальную модель с меньшим шагом решетки и интегрировать её при окончательных подсчетах запасов с основной блочной моделью.

Результирующая блочная модель залежи с несколькими рудными телами в пределах одного из участков месторождения представлена на Рис. 3.12.

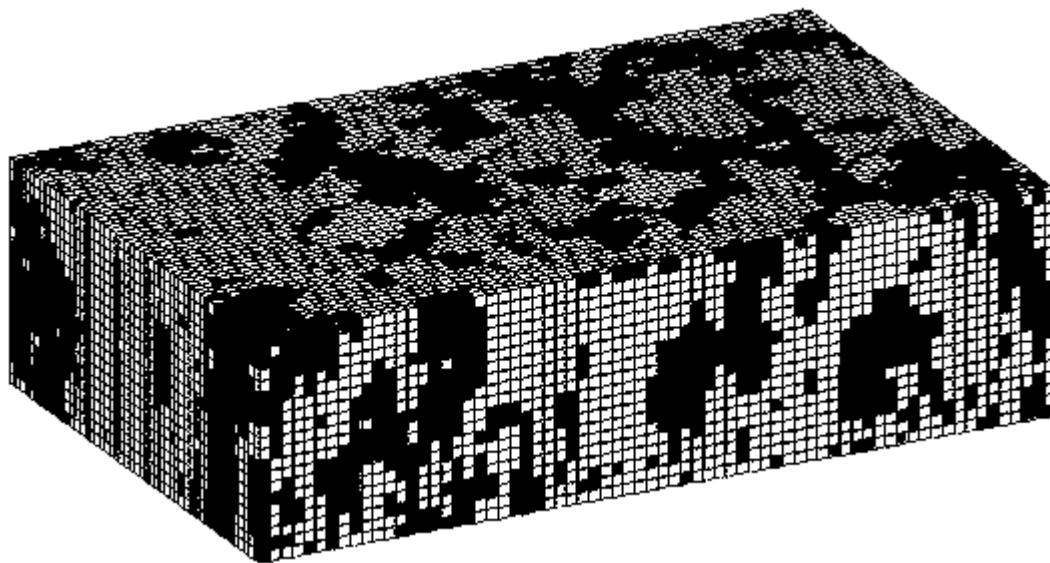


Рис. 3.12. Блочная модель месторождения с участками рудопроявления

Разбиение пространства залежи на регулярные блоки практически стало возможным лишь при использовании компьютеров. Блочная модель с заданными размерами или параметрами прототипа может быть создана после генерации решетки GRID несколькими способами:

1. Выполняется операция пересечения решетки GRID с подготовленной заранее каркасной моделью рудных тел. Происходит заполнение оболочек каркасов блоками с пометкой блоков атрибутами принадлежности к соответствующему геологическому объекту.
2. Для узлов решетки GRID выполняется интерполяция значений показателей по имеющимся точкам данных в целом по месторождению. Модель заполняется блоками. Затем эта модель дополняется и обновляется другими блочными моделями. В первую очередь, в неё вводят топографическую блочной модель и блоки «воздуха» в качестве идентификатора приобретают соответствующий атрибут, обычно равный 0. В другом варианте из регулярной решетки GRID при этом просто удаляются «воздушные» блоки.
3. Для каждого из вертикальных или горизонтальных слоев решетки GRID интерактивно производят оконтуривание зон минерализации полигонами. Это выполняется обычно вручную с помощью курсора мыши на экране компьютера, по данным опробования. Полигоны заполняются блоками заданного размера. После этого запускается процедура интерполяции, которая определяет показатели качества блоков по исходным точкам данных внутри контуров минерализации или в границах различных рудных тел.

Компьютерная реализация. Последовательность операций подсчёта запасов методом регулярных блоков следующая:

- a. Для таблицы модели DHOLES и пространственной решетки (прототипа) GRID 3D выполняется интерполяция геопоказателей в пределах контура подсчёта запасов POLYGONS. Основными методами интерполяции выбираются инверсный или кригинг. В качестве контуров могут быть также выбраны полигоны геологических блоков или участки различных технологических сортов руд. Блочная модель данных GRID 3D пересчитывается для получения прогнозных значений технологических показателей обогащения и сохраняется в БД;
- b. Для модели данных POINTS 2D и поверхностной решетки (прототипа) GRID2D выполняется интерполяция маркшейдерских замеров высотных отметок в пределах контура подсчёта запасов POLYGONS.
- c. Выполняются логические операции объединения, вычитания и пересечения модели данных GRID 3D с моделью данных GRID 2D. Результатом работы данных процедур становится комплексная блочная модель месторождения.
- d. Выполняется суммирование геопоказателей по каждому блоку модели с учетом установленных кондиций и определяются итоговые показатели с определенной геостатистической погрешностью;
- e. Выполняется логическая операция объединения двух множеств – модели данных POLYGONS с моделью точек POINTS. Результатом работы данной процедуры становится модель данных POLYGONS с добавленными в таблицу полями атрибутов и их значений - площади, объёма, средней мощности, среднего содержания компонентов, запасов полезного ископаемого и ценного компонента в контуре.
- f. Составляется отчет о количестве и качестве запасов согласно требуемому формуляру и выводится на экран или на печать.

3.11 ВЫБОР МЕТОДА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ

Характер распределения полезных или вредных компонентов в теле полезного ископаемого, минералогический состав и физические свойства сырья оказывают большое влияние на методы разведки и опробования и через них на выбор способа определения и метод подсчета средних содержаний компонентов.

Выполнение разведочных работ определяется в основном расположением разведочных выработок или плотности сети скважин. Сам тип разведочных выработок мало влияет на выбор метода подсчета запасов. Подсчётные профили могут быть составлены по данным колонкового и ударного бурения, а также по данным шурфовых работ, погоризонтные подсчетные планы строятся по данным ортов и данным горизонтального подземного бурения, геофизического каротажа скважин.

Конфигурация сети разведочных выработок и буровых скважин в максимальной степени обуславливает выбор и возможность использования того или иного метода подсчета запасов. С этой точки зрения все методы разведочных работ могут быть разбиты на следующие основные группы:

1. Разведочные выработки пересекают тело полезного ископаемого через определенные интервалы по мощности и расположены на разведочных профилях, расстояния между которыми значительно превышают расстояния между выработками на профилях. Такое расположение дает возможность построить геологические и подсчетные резервы, пересекающие тело полезного ископаемого в одном направлении. Так разведываются пласты, линзы, пластообразные и плащеобразные тела, жилы, россыпи и другие тела, которые в пространстве имеют одно короткое измерение (мощность) и два длинных, причем чаще одно из последних двух

направлений значительно отличается по своей величине от другого и тело полезного ископаемого в плане или в плоскости падения имеет вытянутую форму.

2. Разведочные выработки пересекают тело полезного ископаемого по мощности через определенные интервалы и расположены по определенной сетке (квадратной, прямоугольной, треугольной, ромбической). Подобное расположение выработок дает возможность построить равноточные геологические и подсчетные разрезы в двух и более направлениях. Такой системой разведываются пласты, линзы, пластообразные тела, жилы, россыпи и другие тела, которые в пространстве имеют одно более короткое измерение, мощность, и два более длинных. Если оба последние измерения равновелики, то тело полезного ископаемого в плане или в плоскости падения имеет форму, близкую к изометрической.
3. Разведочные горные выработки непрерывно прослеживают тело полезного ископаемого как по простиранию, так и по падению, при этом мощность тела полностью вскрывается горными выработками. Чаще всего этим способом разведывают крутопадающие пластообразные тела и жилы, причем разведочные горные выработки разрезают тело на блоки и являются одновременно эксплуатационно-подготовительными выработками.

Когда разведочные работы проводятся только на выборочных горизонтах залежи полезного ископаемого без нарезки на блоки, то тогда подсчет запасов может быть осуществлён методом *горизонтальных разрезов*. Комбинированные системы разведки обычно требуют и комбинирования методов подсчета запасов. Если, например, верхние горизонты тела полезного ископаемого разведаны горными выработками, то запасы этой части можно подсчитать методом *эксплуатационных блоков*; нижние горизонты, разведанные скважинами, в зависимости от расположения последних могут быть подсчитаны методом разрезов либо методом *геологических блоков*.

Рассматривая зависимость методов подсчета запасов от расположения разведочных выработок, можно сделать вывод, что каждому из основных методов подсчета соответствуют те или иные приемы разведки: методу разрезов — разведка месторождений вертикальными профилями, горизонтальными разведочными выработками; методу эксплуатационных блоков — разведка, при которой тело расчленяется на эксплуатационно-подготовительные блоки; методу геологических блоков ближе соответствует расположение выработок по сетке. Согласно работе все месторождения удобно разделить на четыре группы с точки зрения возможности применения основных методов подсчета запасов:

1. Месторождения, которые могут быть разведаны до высших категорий бурением без применения горных работ. Буровые скважины располагаются по разведочным линиям или по сетке.
2. Месторождения, которые могут быть разведаны до высоких категорий комбинацией буровых работ с горными, причем основная роль в разведке принадлежит буровым работам. Скважины и выработки располагаются: по разведочным линиям, по сетке, по определенным горизонтам.
3. Месторождения, которые могут быть разведаны до высоких категорий только горными работами. Если горные выработки прослеживают тело полезного ископаемого по простиранию и падению, то при условии вскрытия выработками полной мощности разведочные работы, как правило, являются одновременно эксплуатационно-подготовительными и нарезают тело на блоки. Если же тело полезного ископаемого прослеживается без вскрытия полной мощности, то для этого требуется проходка специальных горных выработок (ортов, рассечек) или применение подземного бурения. Часто глубокие горизонты тел этой группы месторождений разведываются до низких категорий буровыми скважинами.
4. Месторождения, которые обычно разведываются только горными выработками, располагающимися по определенным горизонтам, что обуславливает применение

для подсчета запасов метода разрезов или геологических блоков, а при нарезке эксплуатационно-подготовительных блоков - метода эксплуатационных, блоков.

Традиционно считается, что наиболее универсальным является *метод разрезов*. Обязательным условием возможности применения этого метода является расположение разведочных выработок по определенным разведочным линиям, профилям или горизонтам, дающее возможность строить геологические и подсчетные разрезы. Для всех четырех групп месторождений может быть применен также метод геологических блоков. Его можно использовать как при геометрически закономерном, так и при не закономерном распределении разведочных выработок. Компьютерные варианты методов разрезов и блоков в целом основаны на традиционной методике, однако помогают существенно увеличить оперативность подсчетов при работе напрямую с большими массивами баз данных геологической информации.

Применение имеющихся в настоящее время компьютерных технологий позволяет полностью модернизировать *метод разрезов* до уровня построения полноценной каркасной модели оболочек рудных тел и автоматизированного подсчета объемов и оценки запасов месторождения. Методы изолиний или объемной палетки Соболевского соответственно заменяются подсчетом запасов по регулярной блочной модели.

Особенности выбора компьютерной методики. Выбор неадекватного метода оценки запасов обычно приводит к высокой погрешности результатов и негативно влияет на результаты проектирования и эксплуатации. В этой связи геостатистические процедуры интерполяции обеспечивают более достоверные результаты, поскольку они в значительной степени зависят от качества исходной базы данных и дают возможность рассчитать погрешность оценки извлекаемых запасов.

Обычный кригинг (Ordinary Kriging - ОК) можно применять в большинстве случаев для построения блочной модели, если наблюдается четкая закономерность в распределении содержаний в трехмерном пространстве. Если вариограмму не удастся аппроксимировать моделью одного из принятых в практике геостатистики законов распределения, то для интерполяции следует применять другие способы: обратных расстояний, ближайшей пробы или соседних регионов. Тем не менее, рекомендуется выборочные оценки, полученные методом кригинга, проверять методом обратных расстояний IDW для контроля. Метод ОК успешно применяется на месторождениях вкрапленных руд, в коре выветривания, для моделирования стратиморфных месторождений, гидротермально-метасоматических, медно-порфировых, скарновых, месторождений железистых кварцитов и алмазов. Однако там, где проявляется высокий эффект самородков, метод ОК заменяют интерполяцией по методу IDW.

Индикаторный кригинг (ИК) является трудоемкой процедурой, но оправдал свое применение на ряде метасоматических месторождениях, где факторы рудопроявления известны лишь в общих чертах. Для таких месторождений характерна смешанная минерализация и невозможность четкого разделения составных компонентов в пространстве. Геологические границы устанавливаются только по данным опробования, поэтому геологическая интерпретация обычно представляет собой достаточно субъективный и трудоёмкий процесс.

Метод обратных расстояний (IDW) более всего подходит для месторождений, где наблюдается четкий структурный контроль оруденения, а также для тех случаев, где разбивка на блоки проводится преимущественно по геологическим критериям.

Полигональный метод (IP) хорошо подходит для оценки узких жильных рудных тел. Оценка сводится к простой процедуре взвешивания содержания на мощность рудного тела. Полигональный метод хорошо проявляет себя там, где нет корреляционной связи между мощностью и содержанием и где в расчет принимается истинная мощность. В других случаях основываться только на результатах полигонального метода нельзя.

Отмеченные основные оценочные методы целесообразно применять на стадии предварительного и полного технико-экономического обоснования. Достаточные для

оценки экономической целесообразности проекта эти методы, тем не менее, не обеспечивают связи между долгосрочным планированием и краткосрочными операционными требованиями. Последние требуют детального знания геологии участка рудного тела. В этом случае для оценки риска важно использовать серию образов рудного тела, например, для оценки эффекта изменчивости содержания на месторождении на выбор эксплуатационной стратегии. В этом смысле на стадии эксплуатации месторождения метод условной симуляции является наиболее подходящим.

Обычным является комплексное применение нескольких методов оценки на одном и том же месторождении, когда оцениваются, например разные минеральные и генетические типы руд или различные геологические типы минерализации. В этом случае, выбор того или иного метода оценки запасов обосновывается как с геологических, так и статистических позиций.

3.12 ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ

Оценка величины запасов производится с той или иной степенью точности, которая зависит, прежде всего: от сложности геологического строения месторождения; от вида разведочной сети и детальности разведки; от точности определения основных параметров, входящих в подсчет; от применяемой компьютерной методики, в том числе и от программно-аппаратных характеристик компьютерной системы. В связи с этим погрешности, возникающие при подсчете запасов, можно разделить на три основные группы:

1. Технические погрешности измерений или опробования, связанные с техникой замеров и определением исходных параметров для подсчета запасов, к которым относятся также инструментальные погрешности замеров мощности, аналитические погрешности химических анализов, определяющих содержание полезных компонентов, точность определения плотности, влажности и др.;
2. Геологические погрешности или ошибки аналогий, связанные с распространением фактических данных замеров и опробования, полученных по отдельным разведочным пересечениям, выработкам и скважинам на близлежащие участки месторождения;
3. Методические погрешности, связанные с применением различных традиционных или компьютерных технологий моделирования и выбором тех или иных методов оценки запасов.

Технические погрешности измерений и опробования связаны как с несовершенством приборов опробования, геофизической разведки и маркшейдерской съёмки, так и с человеческим фактором. Правильно выбранная оператором техника и приёмы измерений позволяют минимизировать эти погрешности.

Основные измерительные ошибки имеют обычно следующий порядок величин:

1. Ошибка определения плотности пород в некоторых случаях может достигать 5-10%. Большие ошибки обычно связаны с малым выходом керна при интервальном опробовании скважин.
2. Погрешность экспертного оконтуривания и определения площадей на планах определяется в 2-3%.
3. Маркшейдерская погрешность составления планов, которая показывает влияние на точность замеров площадей и расстояний между выработками, находится в пределах 0,5-1,0%.
4. Погрешность замеров мощностей определяется в 2-10%, а иногда по скважинам без контрольного каротажа скважин доходят до 20-30%. При этом максимальные ошибки обычно относятся к маломощным телам, тогда как для мощных залежей относительные погрешности всегда меньше.

5. Допустимые средние случайные погрешности химических анализов руд черных, цветных и редких металлов согласно действующим инструкциям при применении классификации запасов твердых полезных ископаемых колеблются в пределах от 1 до 20%, а в некоторых случаях, например для ртути и ванадия при низком их содержании в руде достигают 30%. Максимальные погрешности обычно относятся к рудам с низким содержанием полезного компонента, для богатых руд относительная погрешность химических анализов обычно меньше.

С геологическими *погрешностями*, как правило, связаны значительные ошибки в подсчете запасов. Величина погрешности, зависящая от распространения показателей (мощности, плотности и содержания) отдельных разведочных выработок на весь подсчитываемый объём полезного ископаемого является, как правило, больше, чем погрешности измерений. При подсчете запасов высоких категорий А и В погрешность может достигать до 10—15%. В некоторых случаях, особенно при неправильном представлении геологического строения месторождения и просчётах в определении параметров подсчета запасов, она может быть и выше, что недопустимо.

Среди *методических погрешностей* наибольшее влияние на результаты оценки запасов могут оказывать способы оцифровки рудных тел, приёмы оконтуривания и методы интерполяции при построении цифровой модели месторождения, ЦММ. Здесь также многое зависит от опыта оператора и умения выбрать правильный метод подсчёта. Реализация компьютерной технологии автоматизации процесса моделирования залежи и подсчёта запасов на основе теории оптимизации нейронных сетей и генетических алгоритмов с элементами адаптирующегося искусственного интеллекта позволит полностью устранить влияние субъективного фактора.

Все типы указанных погрешностей могут быть как случайными, так и систематическими. Случайные погрешности, обладая противоположными знаками могут в различной степени взаимно погашать друг друга и не оказывают серьезного влияния на конечные результаты подсчета запасов. Вероятность получения резко преобладающего количества случайных погрешностей с одним знаком весьма незначительна. Систематические погрешности с одним знаком оказывают одностороннее влияние на результаты подсчета и искажают их.

При подсчете запасов по блочной модели построенной с применением интерполяции методом кригинга погрешность оценки, дисперсия, вычисляется автоматически. Это даёт преимущество применения таких геостатистических методов как кригинг или имитация кондиций перед другими методами.

3.12.1 ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА НАДЕЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЛМАЗОВ

Несмотря на большое количество работ в области оценки надежности опробования при разведке месторождений полезных ископаемых, общепринятой и теоретически обоснованной методики решения этой задачи не существует, что объясняется преобладанием эмпирического подхода к решению этих проблем на основе статистических моделей опробуемой среды (Батугин, Черный, 1998, [3]). Предлагаемый подход, основанный на построении стохастических моделей случайно-неоднородных сред, позволяет реализовать опробование разведываемого объекта и проводить целенаправленную интерпретацию данных. Основной задачей научно-исследовательской работы являлось теоретическое обоснование оценки надежности определения содержания алмазов в разведочном блоке на основе математического аппарата построения и анализа стохастических физико-геологических моделей. Построение стохастической модели опробуемой среды для разведочного блока позволяет, как это показано далее, учесть реальные параметры опробуемой среды и схемы опробования разведочного блока:

- среднее содержание алмазов и его пространственную изменчивость;

- гранулометрический состав алмазов;
- плотность кимберлитов и ее изменчивость;
- объемы проб и разведочных блоков.

Разработка математических моделей была нацелена на получение формул, связывающих среднее содержание алмазов в разведочном блоке и числовые характеристики изменчивости содержания (дисперсия, стандартное отклонение) с параметрами опробуемой среды и схемами опробования. Полученные результаты позволяют оценивать надежности подсчета запасов в разведочном блоке.

Достоверность построения стохастических моделей опробуемой среды в разведочном блоке, а также полученных формул для оценки систематических и случайных составляющих ошибки подсчета запасов в разведочном блоке, подтверждены вычислительным экспериментом, основанным на статистической обработке данных по реальному разведочному блоку.

Основные факторы, влияющие на величину оценки запасов в разведочном блоке фиксированного объема

3.12.2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ И ДИСПЕРСИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЛМАЗОВ В ПРОБАХ

Содержание алмазов в пробе массой Q определяется из соотношения

$$C = \frac{A}{Q}, \quad (3.21)$$

где A - суммарная масса m кристаллов, попавших в объем пробы; $Q = \delta V$ (δ - плотность материала пробы, V - объем пробы). Если a_i - масса i -го кристалла, то

$$A = \sum_{i=1}^m a_i \quad (3.22)$$

Будем рассматривать содержание (3.21) как величину случайную, так как m - количество алмазов, попавших в объем пробы, является случайной величиной; масса отдельных кристаллов является случайной величиной и, кроме того, в силу неоднородности опробуемых пород плотность материала пробы также изменяется случайным образом.

Используя приемы нахождения числовых характеристик, известные в теории вероятностей [Вентцель, Овчаров, 1987] и принципы построения и анализа математических моделей случайно-неоднородных сред, представленных точечными неоднородностями [Вахромеев, Давыденко, 1987], найдем математическое ожидание (среднее значение) и дисперсию содержания алмазов в пробе по формуле полного математического ожидания

$$\mu_C = M\left[\frac{A}{Q}\right] = M\left[M\left[\frac{A}{\delta V} \mid \delta\right]\right], \quad (3.23)$$

где $M\left[\frac{A}{\delta V} \mid \delta\right]$ - условное математическое ожидание, которое определяется при фиксированном значении плотности. Очевидно

$$M\left[\frac{A}{\delta V} \mid \delta\right] = \frac{1}{\delta V} M\left[M\left[\sum_{i=1}^m a_i \mid m\right]\right] = \frac{1}{\delta V} M[m\mu_a] = \frac{1}{\delta V} \mu_m \mu_a = \frac{1}{Q} \mu_m \mu_a, \quad (3.24)$$

где μ_a - математическое ожидание массы кристалла алмаза, μ_m - математическое ожидание числа кристаллов в объеме пробы.

Подставляя (3.24) в (3.23), получим

$$\mu_C = M\left[\frac{1}{Q} \mu_m \mu_a\right] = M\left[\frac{1}{\delta V} \mu_m \mu_a\right] = \frac{\mu_m \mu_a}{Q} = \frac{\mu_m}{V} \mu_a \mu_{\delta}, \quad (3.25)$$

где $\mu_{1/\delta} = M[\frac{1}{\delta}]$.

Таким образом, формула (3.25) связывает основные параметры опробуемой среды с параметрами пробы (масса, объем), которые необходимо учитывать при оценке содержания. Так как качество пробоотбора характеризуется не только уровнем содержания, но также и его изменчивостью, получим выражение для дисперсии содержания алмазов в пробе. Основываясь на известных правилах теории вероятностей, дисперсия содержания в пробе

$$D[C] = M[C^2] - \mu_C^2, \quad (3.26)$$

где $M[C^2] = M[\frac{A^2}{Q^2}] = M[M[\frac{A^2}{(\delta V)^2} | \delta]]$,

$$M[\frac{A^2}{(\delta V)^2} | \delta] = \frac{M[(\sum_{i=1}^m a_i)^2]}{(\delta V)^2} = \frac{1}{(\delta V)^2} (M[\sum_{i=1}^m a_i^2] + M[\sum_{i \neq j}^{m(m-1)} a_i a_j]).$$

Так как массы i -го и j -го кристаллов ($i \neq j$) можно полагать независимыми случайными величинами, а $M[a^2] = \sigma_a^2 + \mu_a^2$, то

$$M[\frac{A^2}{(\delta V)^2} | \delta] = \frac{mM[a^2] + m(m-1)\mu_a^2}{(\delta V)^2} = \frac{\mu_m \sigma_a^2 + M[m^2]\mu_a^2}{(\delta V)^2} = \frac{\mu_m \sigma_a^2 + M[m^2]\mu_a^2}{Q^2} \quad (3.27)$$

тогда

$$M[\frac{A^2}{Q^2}] = M[\frac{\mu_m \sigma_a^2 + M[m^2]\mu_a^2}{Q^2}] = \frac{(\mu_m \sigma_a^2 + M[m^2]\mu_a^2)}{V^2} \mu_{1/\delta^2} \quad (3.28)$$

Подставляя последнее выражение в (3.27), учитывая (3.25) и то, что $M[m^2] = \sigma_m^2 + \mu_m^2$, получим

$$D[C] = \frac{\mu_m \sigma_a^2 + \sigma_m^2 \mu_a^2}{Q^2} = \frac{\mu_m \sigma_a^2 + \sigma_m^2 \mu_a^2}{V^2} \mu_{1/\delta^2}, \quad (3.29)$$

где $\mu_{1/\delta^2} = M[\frac{1}{\delta^2}]$.

Выражения (3.28) и (3.29) связывают математическое ожидание и дисперсию содержания алмазов с параметрами среды и пробоотбора.

В дальнейшем нам понадобится также оценка величины ковариации содержания и плотности.

$$\text{cov}(C, \delta) = M[C\delta] - \mu_C \mu_\delta \quad (3.30)$$

$$M[C\delta] = M[\frac{A}{Q} \delta | \delta] = \frac{M[\sum_{i=1}^m a_i]}{V} = \frac{1}{V} \mu_m \mu_a \quad (3.31)$$

и, учитывая (3.24), получим

$$\text{cov}(C, \delta) = \frac{1}{V} \mu_m \mu_a (1 - \mu_{1/\delta} \mu_\delta) \quad (3.32)$$

Из (3.32) видно, что зависимость между содержанием и плотностью определяется главным образом диапазоном изменения плотности – чем больше разброс плотностей, тем больше произведение $\mu_{1/\delta} \mu_\delta$ отличается от единицы.

3.12.3 СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ОШИБКА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ В БЛОКЕ

Положим, что по ряду геологических соображений и результатам опробования выделен однородный в определенном смысле разведочный блок объемом V_b . Очевидно, что запасы в этом блоке P_b определяются по формуле

$$P_b = \bar{C}\bar{\delta}V_b, \quad (3.33)$$

где $\bar{C}$ и $\bar{\delta}$ - соответственно статистические оценки среднего содержания и средней плотности пород в блоке. В дальнейших выводах будем полагать объем блока в выражении (3.33) фиксированной величиной, так как вопрос учета ошибок геометризации нуждается в отдельном рассмотрении.

Рассмотрим вопрос об определении математического ожидания и дисперсии величины запасов P_b на основе практически реализуемой схемы подсчета запасов.

Параметры подсчета запасов в блоке могут быть представлены в большинстве случаев в виде матрицы (Таблица 3.3).

Таблица 3.3. Данные для подсчета запасов

Номер пробы для определения содержания	Масса пробы Q	Масса алмазов A	Содержание $C = \frac{A}{Q}$	Номер пробы для определения плотности	Плотность δ	Пробы, в которых одновременно определялись C и δ
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
				1	δ_1	
1	Q_1	A_1	C_1	2	δ_2	1
2	Q_2	A_2	C_2	3	δ_3	2
3	Q_3	A_3	C_3	4	δ_4	3
4	Q_4	A_4	C_4	5	δ_5	4
5	Q_5	A_5	C_5	...	...	...
...	...	...	...	j	δ_j	k
i	Q_i	A_i	C_i	...	...	...
...	...	...	...	$m-1$	δ_{m-1}	$r-1$
$n-2$	Q_{n-2}	A_{n-2}	C_{n-2}	m	δ_m	r
$n-1$	Q_{n-1}	A_{n-1}	C_{n-1}			
n	Q_n	A_n	C_n			
Всего проб n			$\bar{C}$	Всего проб m	$\bar{\delta}$	Всего проб r

Допустим, что оценки среднего содержания и средней плотности определяются по стандартным формулам для среднего арифметического:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad \text{и} \quad \bar{\delta} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_j. \quad (3.34)$$

Отметим, что в общем случае число проб, в которых одновременно определяются содержание и плотность, различно и поэтому $r \leq \min(n, m)$, а в том случае, когда содержание и плотность определялись в разных пробах $r=0$.

Найдем математическое ожидание выражения (3.33).

С учетом (3.34) математическое ожидание оценки запасов в блоке

$$\mu_{P_b} = M[P_b] = M[\bar{C}\bar{\delta}V_b] = V_b M[\bar{C}\bar{\delta}] \quad (3.35)$$

где

$$M[\bar{C}\bar{\delta}] = M\left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i\right) \cdot \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_j\right)\right] = \frac{1}{nm} M\left[\sum_{i=1}^r C_i \delta_i + \sum_{j,k=1, j \neq k}^{nm-r} C_j \delta_k\right].$$

Учитывая, что C_j и δ_k , а также $C_i \delta_i$ и $C_s \delta_s$ при $i \neq s$, можно считать независимыми случайными величинами, выбранными из одной генеральной совокупности с параметрами:

$$\mu_C = M[C_i], \quad \mu_\delta = M[\delta_i] \quad \text{и} \quad \mu_{C\delta} = M[C_i \delta_i],$$

получим

$$M[\bar{C}\bar{\delta}] = \frac{1}{nm} [r\mu_{C\delta} + (nm-r)\mu_C\mu_\delta] = \frac{r}{nm} \mu_{C\delta} + \left(1 - \frac{r}{nm}\right) \mu_C\mu_\delta, \quad (3.36)$$

а формула для математического ожидания запасов

$$\mu_{P_b} = \left[\frac{r}{nm} \mu_{C\delta} + \left(1 - \frac{r}{nm}\right) \mu_C\mu_\delta\right] V_b \quad (3.37)$$

Полученная формула со всей очевидностью показывает источник и величину систематической ошибки при подсчете запасов, так как смещение математического ожидания $\Delta\mu_P = \mu_{P_b} - \mu_P$ относительно «истинного» значения величины запасов

$$\mu_P = \mu_C\mu_\delta V_b \quad (3.38)$$

составляет

$$\Delta\mu_P = \frac{r}{nm} (\mu_{C\delta} - \mu_C\mu_\delta) V_b = \frac{r}{nm} \text{cov}(C, \delta) V_b, \quad (3.39)$$

где $\text{cov}(C, \delta) = \mu_{C\delta} - \mu_C\mu_\delta$ - ковариация содержания и плотности, определенная выражением (3.32), поэтому

$$\Delta\mu_P = \frac{r}{nm} \mu_m \mu_a (1 - \mu_{1/\delta} \mu_\delta) \frac{V_b}{V}, \quad (3.40)$$

где V – объем некоторой «усредненной» по размерам пробы, для которой берутся параметры μ_m , $\mu_{1/\delta}$ и μ_δ .

Из полученного выражения следует, что величина завышения запасов пропорциональна математическому ожиданию числа частиц в «стандартной» пробе μ_m , математическому ожиданию массы кристаллов и тем меньше, чем ближе значение произведения $\mu_{1/\delta} \mu_\delta$ к 1 – то есть при малых изменениях плотности в пробах.

Формула (3.40) со всей очевидностью показывает природу так называемого масштабного эффекта [Батугин, Черный, 1998], по сути своей являющимся следствием зависимости систематической ошибки определения параметров случайно-неоднородной среды от объема пробы.

Кроме того, величина систематического отклонения (3.40) зависит от объемов выборок, по которым оцениваются средние значения содержаний и плотности. Наиболее благоприятный, но также менее реальный случай, - оценка среднего содержания в блоке и средней плотности по различным выборкам. В этом случае $r=0$ и систематическая ошибка отсутствует. С другой стороны, очевидно, что при $n=t$ и $n=r$ величина смещения (отклонения) обратно пропорциональна объему выборки или суммарному объему проб $V_\Sigma = nV$:

$$\Delta\mu_p = \frac{1}{n} \mu_m \mu_a (1 - \mu_{\gamma/\delta} \mu_\delta) \frac{V_b}{V} = \mu_m \mu_a (1 - \mu_{\gamma/\delta} \mu_\delta) \frac{V_b}{V_\Sigma} \quad (3.41)$$

3.12.4 СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ОШИБКА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ ДЛЯ ПУАССОНОВСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЛМАЗОВ

Очевидно, что на основе данных опробования и гранулометрического анализа состава алмазов, возможно получение статистических оценок величин, входящих в полученные выражения. Но для конкретной стохастической модели среды на основе формул (3.37)-(3.39) и (3.41)-(3.45) возможно получение выражений, связывающих искомые характеристики с параметрами среды и пробоотбора. Действительно, как было показано ранее [Вахромеев, Давыденко, 1987; Давыденко, 2001; Батугин, Черный, 1998; Swan, Sandilands, 1996; Vakhromeyev, Davydenko, 1987, 1989.], для описания моделей с точечными неоднородностями (в данном случае это кристаллы алмазов) целесообразно использовать закон распределения Пуассона (закон редких событий), единственным параметром которого является интенсивность λ - среднее количество кристаллов на единицу объема. В случае необходимости, при наличии соответствующей информации, этот параметр можно также рассматривать как функцию координат $\lambda(x, y, z)$, что позволяет изучать поведение содержания алмазов и его изменчивость в зависимости от характера изменения концентраций алмазов в пространстве, то есть при неоднородном пуассоновском поле.

Известно (Вентцель, Овчаров, 1987 [21]; Пугачев, 1979 [81]), что для пуассоновского поля параметры

$$\mu_m = \sigma_m^2 = \lambda V \quad (3.42)$$

Подстановка этого выражения в формулы (3.31) - (3.33) позволяет получить выражения для математического ожидания, дисперсии и ковариации:

$$\mu_C = \lambda \mu_a \mu_{\gamma/\delta}, \quad (3.43)$$

$$\sigma_C^2 = \frac{\lambda}{V} (\sigma_a^2 + \mu_a^2) \mu_{\gamma/\delta^2}, \quad (3.44)$$

$$\text{cov}(C, \delta) = \lambda \mu_a (1 - \mu_{\gamma/\delta} \mu_\delta) \quad (3.45)$$

Для пуассоновской модели выражения (3.38) и (3.40) можно записать в виде

$$\mu_p = \lambda \mu_a \mu_{\gamma/\delta} \mu_\delta V_b, \quad (3.46)$$

$$\Delta\mu_p = \frac{r}{nm} \lambda V_b \mu_a (1 - \mu_{\gamma/\delta} \mu_\delta), \quad (3.47)$$

а относительная величина систематической ошибки подсчета запасов в блоке

$$d_p = \frac{\Delta\mu_p}{\mu_p} = \frac{r}{nm} \left(\frac{1}{\mu_{\gamma/\delta} \mu_\delta} - 1 \right) \quad (3.48)$$

При $n=t$ формула (3.48) приобретает вид

$$d_p = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{\mu_{1/\delta} \mu_\delta} - 1 \right). \quad (3.49)$$

Выражения (3.48) и (3.49) показывают, что относительное систематическое расхождение в подсчете запасов зависит только от схемы определения средних содержаний и плотности, объема пробоотбора и закона распределения плотности, так как именно от последнего зависит величина произведения $\mu_{1/\delta} \mu_\delta$.

В качестве примера рассмотрим равномерное распределение плотности на интервале $\delta_1 \div \delta_2$. В этом случае

$$\mu_\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}; \quad \mu_{1/\delta} = \frac{1}{\delta_2 - \delta_1} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{d\delta}{\delta} = \frac{\ln(\frac{\delta_2}{\delta_1})}{\delta_2 - \delta_1}; \quad \mu_{1/\delta} \mu_\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2(\delta_2 - \delta_1)} \ln(\frac{\delta_2}{\delta_1})$$

При $n=m$ имеем $d_p = \frac{1}{n} \left(\frac{2(\delta_2 - \delta_1)}{(\delta_1 + \delta_2) \ln(\frac{\delta_2}{\delta_1})} - 1 \right)$, а изменение величины относительной систематической ошибки (в %) показано на Рис. 3.13 и Таблица 3.4.

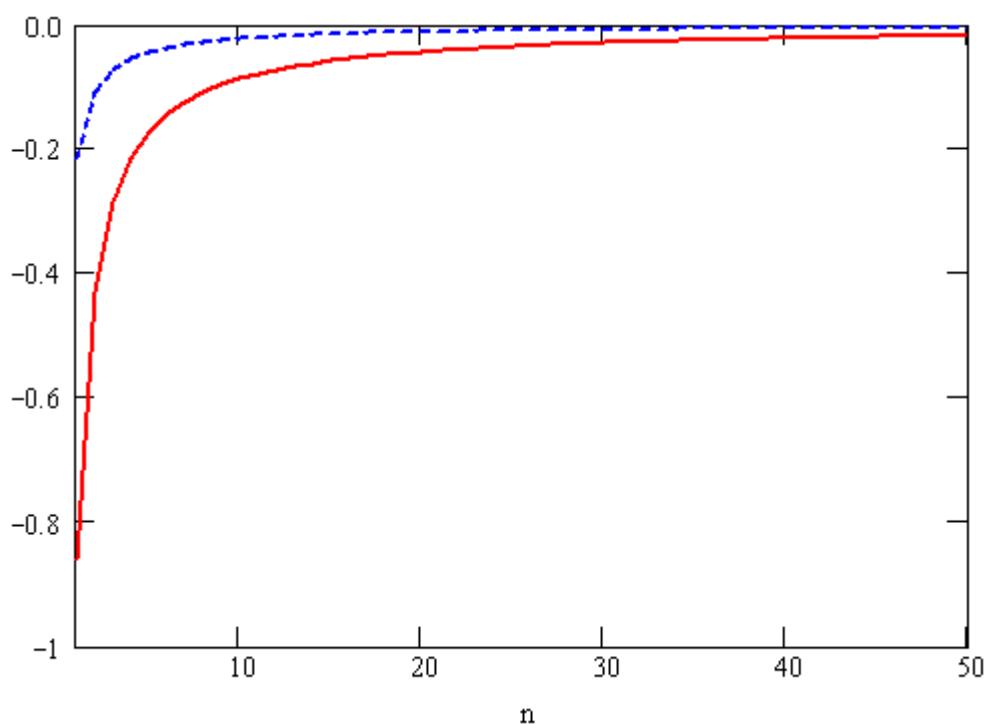


Рис. 3.13. Зависимость величины относительной систематической ошибки d_p (%) от объема выборки n при различных диапазонах изменения плотности: $2,1 \div 2,9$ г/см³ (сплошная линия); $2,3 \div 2,7$ г/см³ (штриховая линия).

Таблица 3.4. Зависимость систематической ошибки d_p (%) от объема выборки n в различных диапазонах изменения плотности

№ п/п	N	Диапазон изменения плотности, г/см ³	
		2,1÷2,9	2,3÷2,7
1	10	-0,086	-0,021
2	20	-0,043	-0,011
3	30	-0,029	-0,007
4	40	-0,021	-0,005
5	50	-0,017	-0,004

6	60	-0,014	-0,004
7	70	-0,012	-0,003
8	80	-0,011	-0,003
9	90	-0,010	-0,002
10	100	-0,009	-0,002

Таким образом, полученные зависимости показывают, что при объемах выборок n равным нескольким сотням проб в реальных диапазонах изменения плотностей величина относительной систематической ошибки подсчета запасов в блоке по формуле (3.33) не превышает долей процента и практически пренебрежимо мала. Очевидно, что главным источником ошибки подсчета запасов в блоке фиксированного объема должна являться дисперсия случайной величины P , обусловленная свойствами случайно-неоднородной среды и параметрами пробоотбора.

3.12.5 СЛУЧАЙНАЯ ОШИБКА ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ В БЛОКЕ

Дисперсия оценки подсчета запасов в блоке для модели содержаний

В соответствии с известными теоремами теории вероятностей дисперсия запасов, вычисляемых по формуле (3.35), при фиксированном объеме разведочного блока

$$D[P_b] = D[\bar{C}\bar{\delta}]V_b^2 = (M[(\bar{C}\bar{\delta})^2] - M^2[\bar{C}\bar{\delta}])V_b^2 \quad (3.50)$$

В этой формуле вычитаемое можно определить, используя полученный ранее результат (3.40):

$$M^2[\bar{C}\bar{\delta}] = \frac{1}{(nm)^2} [r^2 \mu_{C\delta}^2 + 2r(nm-r)\mu_{C\delta}\mu_C\mu_\delta + (nm-r)^2 \mu_C^2 \mu_\delta^2] \quad (3.51)$$

Используя выражения (3.39), найдем

$$\begin{aligned} M[(\bar{C}\bar{\delta})^2] &= \frac{1}{(nm)^2} M[(\sum_{i=1}^r C_i \delta_i + \sum_{j \neq k}^{nm-r} C_j \delta_k)^2] = \\ &= \frac{1}{(nm)^2} [M[(\sum_{i=1}^r C_i \delta_i)^2] + 2M[\sum_{i=1}^r C_i \delta_i \sum_{j \neq k}^{nm-r} C_j \delta_k] + M[(\sum_{j,k=1, j \neq k}^{nm-r} C_j \delta_k)^2]] \end{aligned} \quad (3.52)$$

При нахождении математических ожиданий слагаемых разделим суммы зависимых и независимых величин

$$M[(\sum_{i=1}^r C_i \delta_i)^2] = M[\sum_{i=1}^r (C_i \delta_i)^2] + M[\sum_{j \neq k}^{r(r-1)} (C_j \delta_j)(C_k \delta_k)] = rM[(C\delta)^2] + r(r-1)\mu_{C\delta}^2 \quad (3.53)$$

$$M[\sum_{i=1}^r C_i \delta_i \sum_{j,k=1, j \neq k}^{nm-r} C_j \delta_k] = M[\sum_{i \neq j, i \neq k, j \neq k}^{nm-r} C_i \delta_i C_j \delta_k] = r(nm-r)\mu_{C\delta}\mu_C\mu_\delta$$

$$M[(\sum_{j,k=1, j \neq k}^{nm-r} C_j \delta_k)^2] = M[\sum_{j \neq k}^{nm-r} (C_j \delta_j)^2] + M[\sum_{j \neq k}^{(nm-r)(nm-r-1)} (C_j \delta_j)(C_k \delta_k)] = \quad (3.54)$$

$$= (nm - r)M[C^2]M[\delta^2] + (nm - r)(nm - r - 1)\mu_C^2\mu_\delta^2$$

Подставляя полученные выражения в (3.52), а затем (3.52) и (3.51) в (3.50), после несложных преобразований с учетом известных соотношений между начальными и центральными моментами случайных величин получим

$$D[P_b] = \frac{V_b^2}{(nm)^2} [rD[C\delta] + (nm - r)(D[C]D[\delta] + D[C]\mu_\delta^2 + D[\delta]\mu_C^2)] \quad (3.55)$$

Выражение (3.55) позволяет получить оценку ошибки подсчета запасов по крайней мере двумя способами:

- подстановкой в него статистических оценок дисперсий и математических ожиданий содержаний и плотности по разведочному блоку;
- заданием параметров модели случайно-неоднородной опробуемой среды и параметров пробоотбора.

Полученное выражение полезно проанализировать с позиций частных, но практически важных случаев.

1. Определение содержаний и плотности в несовпадающих пробах. В этом случае $r=0$ и

$$D[P_b] = \frac{V_b^2}{nm} [(D[C]D[\delta] + D[C]\mu_\delta^2 + D[\delta]\mu_C^2)] \quad (3.56)$$

При такой схеме пробоотбора ошибка подсчета запасов может регулироваться объемом проводимого опробования для определения содержаний и плотности.

2. Определение содержаний и плотности в одних и тех же пробах. В этом случае $n=m$ и $r=n$:

$$D[P_b] = V_b^2 \left[\frac{1}{n^3} D[C\delta] + \frac{(n-1)}{n^3} (D[C]D[\delta] + D[C]\mu_\delta^2 + D[\delta]\mu_C^2) \right] \quad (3.57)$$

В отличие от первого случая из выражения (3.57) следует, что увеличение объема выборки наиболее существенно сказывается на уменьшении дисперсии произведения, а второе слагаемое в этом выражении обратно пропорционально квадрату объема выборки, так как при значительных объемах выборки вклад слагаемого $\frac{1}{n^3} D[C\delta]$ практически незаметен и выражение (3.57)

$$D[P_b] \approx \frac{V_b^2}{n^2} (D[C]D[\delta] + D[C]\mu_\delta^2 + D[\delta]\mu_C^2) \quad (3.58)$$

практически совпадает с формулой (3.56).

Полученные выражения показывают, что существенные различия в ошибках подсчета запасов, связанные с отличием определения содержаний и плотностей в совпадающих или несовпадающих пробах, проявляются только при малом количестве проб.

3.12.6 СЛУЧАЙНАЯ ОШИБКА ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ДЛЯ ПУАССОНОВСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЛМАЗОВ

Воспользуемся рассмотренной ранее пуассоновской моделью случайно-неоднородной среды. Прежде всего, найдем для этой модели выражение для дисперсии, используя результаты, полученные ранее при выводе формулы (3.29):

$$D[C\delta] = M[(C\delta)^2] - \mu_{C\delta}^2 = \frac{1}{V^2} [\mu_m \sigma_a^2 + \sigma_m^2 \mu_a^2]. \quad (3.59)$$

Для пауссоновской модели получаем

$$D[C\delta] = \frac{\lambda}{V} [\sigma_a^2 + \mu_a^2]. \quad (3.60)$$

Подставляя выражения (3.43), (3.44) и (3.60) в формулу (3.55), получим

$$D[P_b] = \frac{\lambda V_b^2}{(nm)^2} \left(\frac{rM[a^2]}{V} + (nm - r) \left(\frac{M[a^2]M[\frac{1}{\delta^2}]M[\delta^2]}{V} + \lambda \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \right) \right) \quad (3.61)$$

.

В частном случае при определении содержаний и плотности в несовпадающих пробах $r=0$ и

$$D[P_b] = \frac{\lambda V_b^2}{nm} \left(\frac{M[a^2]M[\frac{1}{\delta^2}]M[\delta^2]}{V} + \lambda \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \right). \quad (3.62)$$

Полученное выражение показывает, что помимо увеличения количества проб, уменьшать ошибку подсчета запасов возможно также за счет увеличения объема V частных проб. Но в последнем случае уменьшение дисперсии возможно только до определенного предела, так как теоретический минимум дисперсии

$$D_{\min}[P_b] = \lim_{V \rightarrow \infty} (D[P_b]) = \frac{\lambda^2 V_b^2}{nm} \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \quad (3.63)$$

В случае полностью совпадающих проб при $n=m$ и $r=n$ и $n > 1$

$$D_n[P_b] = \lambda V_b^2 \left(\frac{M[a^2]}{n^3 V} + \frac{1}{n^2} \left(\frac{M[a^2]M[\frac{1}{\delta^2}]M[\delta^2]}{V} + \lambda \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \right) \right) \quad (3.64)$$

.

Из этой формулы также следует, что при больших объемах выборки $n > 100$ слагаемое $\frac{M[a^2]}{n^3 V}$ имеет высший порядок малости по сравнению со вторым членом суммы.

Полученные выражения можно преобразовать, введя в них в качестве параметра математическое ожидание числа кристаллов $\mu_K = \lambda V$, статистическая оценка которого возможна по данным разведочного опробования. В этом случае формулы (3.62) - (3.64) принимают соответственно следующий вид:

$$D[P_b] = \frac{\mu_K}{nm} \left(\frac{V_b}{V} \right)^2 \left(M[a^2]M[\frac{1}{\delta^2}]M[\delta^2] + \mu_K \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \right), \quad (3.65)$$

$$D_{\min}[P_b] = \frac{\mu_K^2}{nm} \left(\frac{V_b}{V} \right)^2 \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta], \quad (3.66)$$

$$D_n[P_b] = \mu_K \left(\frac{V_b}{V} \right)^2 \left(\frac{M[a^2]}{n^3} + \frac{1}{n^2} \left(M[a^2] M\left[\frac{1}{\delta^2}\right] M[\delta^2] + \mu_K \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \right) \right) \quad (3.67)$$

Рассмотрим более подробно смысл полученных выражений на примере последней формулы. Учтем, что начальный момент $M[a^2] = D[a] + \mu_a^2$, тогда выражение (3.67) можно записать в виде

$$D_n[P_b] = \frac{\mu_K}{n^2} \left(\frac{V_b}{V} \right)^2 \left((D[a] + \mu_a^2) \left(\frac{1}{n} + M\left[\frac{1}{\delta^2}\right] M[\delta^2] \right) + \mu_K \mu_a^2 \mu_{1/\delta}^2 D[\delta] \right) \quad (3.68)$$

Очевидно, что при увеличении объема выборки $\frac{1}{n} \rightarrow 0$ и при малых изменениях плотности $D[\delta] \rightarrow 0$ и $M\left[\frac{1}{\delta^2}\right] M[\delta^2] \rightarrow 1$, дисперсия

$$D_n[P_b] \square \frac{\mu_K}{n^2} \left(\frac{V_b}{V} \right)^2 (D[a] + \mu_a^2), \quad (3.69)$$

$$\mu_P \square \mu_K \left(\frac{V_b}{V} \right) \mu_a, \quad (3.70)$$

а стандартная ошибка подсчета запасов $S_n[P_b]$ и коэффициент вариации $k_n[P_b]$

$$S_n[P_b] = \sqrt{D_n[P_b]} = \frac{V_b}{nV} \sqrt{\mu_K (D[a] + \mu_a^2)} = \frac{V_b}{nV} \sqrt{\lambda V (D[a] + \mu_a^2)} \quad (3.71)$$

$$k_n[P_b] = \frac{S_n[P_b]}{\mu_P} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{D[a] + \mu_a^2}{\mu_K \mu_a^2}} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{k_a^2 + 1}{\mu_K}} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{k_a^2 + 1}{\lambda V}}, \quad (3.72)$$

где $k_a^2 = \frac{D[a]}{\mu_a^2}$ - квадрат коэффициента вариации массы кристалла.

Таким образом, выражение (3.71) показывает, что ошибка подсчета запасов зависит от объема разведочного блока V_b , объема «стандартной» разведочной пробы V , математического ожидания количества кристаллов в «стандартной» пробе μ_K , а через этот параметр она связана с концентрацией количества кристаллов в единице объема λ и объемом «стандартной» пробы V , а также с параметрами изменчивости массы кристаллов: математическим ожиданием μ_a и дисперсией $D[a]$. Коэффициент вариации (3.72) зависит от коэффициента вариации массы кристалла, объема пробы, количества проб и параметра λ .

3.12.7 ПОГРЕШНОСТЬ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ ПО РАЗВЕДОЧНОМУ БЛОКУ

В качестве исходных данных была взята таблица результатов опробования по реальному разведочному блоку. Далее по разработанной в среде MathCAD-11 программе

была произведена статистическая обработка данных этой таблицы, позволившая получить статистические оценки параметров для определения дисперсии оценки запасов по модели содержаний (3.55) и модели Пуассона (3.61).

3.12.8 ОШИБКА ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ДЛЯ МОДЕЛИ СОДЕРЖАНИЙ

В приведенные ниже формулы

$$\mu_p = \left[\frac{r}{nm} \mu_{C\delta} + \left(1 - \frac{r}{nm} \right) \mu_C \mu_\delta \right] V_b$$

$$D[P_b] = \frac{V_b^2}{(nm)^2} [rD[C\delta] + (nm - r)(D[C]D[\delta] + D[C]\mu_\delta^2 + D[\delta]\mu_C^2)]$$

подставлялись статистические оценки параметров (Таблица 3.5) и значения параметров выборки и объем разведочного блока 10000 куб.м.

$$\begin{aligned} n &= 378 & V_b &= 100000 & r/nm &= 0.0026455 \\ m &= 238 & \mu_\delta &= 2.443 \\ r &= 238 & D[\delta] &= 0.009025 \end{aligned}$$

Таблица 3.5. Статистические характеристики выборки данных по разведочному блоку

Таблица 3.5.
Статистические характеристики выборки данных по
разведочному блоку для модели содержаний

Характеристика	Объем	Минимал	Максимал	Среднее	Стандарт
Плотность (δ), т/м	238	2.22	2.9	2.443	0.095
C84, карат/т					
C84*δ, карат/м3					
C42*δ, карат/м3					
C21*δ, карат/м3					
C105*δ, карат/м3					
C05*δ, карат/м3					
C805*δ, карат/м3					
C205*δ, карат/м3	238	0.072	8.48	3.08	1.493

Результаты приводят Таблица 3.6 и Таблица 3.7.

Таблица 3.6. Входные параметры расчета систематической и случайной ошибок подсчета запасов

Основные составляющие для расчета систематической и случайной ошибок подсчета запасов для модели содержаний

Класс крупности	μ_c	$D[C]$	$\mu_{c\delta}$	$D[C\delta]$	$D[C]D[\delta]$	$D[C]\mu_{\delta}^2$	$D[\delta]\mu_c^2$
84	0.19000	1.07330	0.60800	9.65345	0.00969	6.40570	0.00033
42	0.64600	0.50552	1.61100	3.22562	0.00456	3.01708	0.00377
21	0.82200	0.19360	2.01700	1.24323	0.00175	1.15545	0.00610
105	0.43500	0.04973	1.06300	0.30250	0.00045	0.29680	0.00171
05	0.06700	0.01613	0.15400	0.11628	0.00015	0.09626	0.00004
805	2.09300	1.46900	5.29900	4.10500	0.01326	8.76736	0.03954
205	1.25700	0.59300	3.08000	1.49300	0.00535	3.53917	0.01426

По приведенным данным (Таблица 3.6) видно, что основной вклад в дисперсию содержаний вносит слагаемое, расположенное в предпоследней колонке – произведение дисперсии содержаний на квадрат среднего значения плотности. Оценки систематической и случайной ошибок модели содержаний показывают практически незначимые значения систематической ошибки и весьма небольшие величины абсолютных и относительных ошибок подсчета запасов в разведочном блоке.

Таблица 3.7. Запасы и ошибки их определения

Запасы, систематическая и случайная ошибки в разведочном блоке объемом 100000 куб.м. для модели содержаний

Класс крупности	Запасы P , карат	μ_P , карат	Смещение $(P-\mu_P)$, карат	Относительная ошибка	Случайная ошибка	Коэффициент
84	46417	46455	-38.1	-0.08	845	1.82
42	157818	157826	-8.7	-0.01	580	0.37
21	200815	200817	-2.3	0.00	360	0.18
105	106271	106271	-0.1	0.00	182	0.17
05	16368	16366	2.6	0.02	104	0.63
805	511320	511369	-49.2	-0.01	989	0.19
205	307085	307088	-2.4	0.00	628	0.20

3.12.9 ОШИБКА ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ДЛЯ ПУАССОНОВСКОЙ МОДЕЛИ

Для пуассоновской модели распределения алмазов по крупности в приведенные ниже формулы

$$\mu_p = \mu_K \mu_b \mu_{1/\delta} \mu_{\delta} \frac{V_b}{V}$$

$$A(a) = r \hat{M} [a^2]$$

$$B(a, \delta) = (nm - r) \hat{M} [a^2] \hat{M} \left[\frac{1}{\delta^2} \right] \hat{M} [\delta^2]$$

(3.73)

$$C(K, a, \delta) = (nm - r) \hat{\mu}_K \hat{\mu}_a^2 \hat{\mu}_{1/\delta}^2 \hat{D}[\delta]$$

$$\hat{D}[P_b] = \frac{\hat{\mu}_K}{(nm)^2} \left(\frac{V_b}{\hat{V}} \right)^2 [A(a) + B(a, \delta) + C(K, a, \delta)]$$

подставлялись статистические оценки параметров (Таблица 3.8) и значения параметров выборки, а также статистические характеристики плотности и ее производных

$n = 378$	$V_b = 100000$	$\mu_{\delta^2} = 5.978$
$m = 238$	$\mu_{\delta} = 2.443$	$\mu_{1/\delta} = 0.41$
$r = 238$	$D[\delta] = 0.01$	$\mu_{1/\delta^2} = 0.168$
$nm - r = 89726$	$\mu_{\delta^2} \mu_{1/\delta^2} = 1.004304$	$\mu_{\delta} \mu_{1/\delta} = 1.00163$

Таблица 3.8. Статистические характеристики по блоку для модели Пуассона

Статистические характеристики выборки данных по разведочному блоку для расчетов на основе модели Пуассона

Характерист	Объем	Минимально	Максимальн	Среднее	Стандарт
Масса, т					
Объем, м ³	238.0000	0.0800	0.2280	0.1810	0.0160
Плотность (δ)	238.0000	2.2200	2.9000	2.4430	0.0950
δ^2 , (т/м ³) ²	238.0000	4.9280	8.4100	5.9780	0.4700
δ^{-1} , (т/м ³) ⁻¹	238.0000	0.3450	0.4500	0.4100	0.0160
δ^{-2} , (т/м ³) ⁻²	238.0000	0.1190	0.2030	0.1680	0.0130
N84, шт					
V84 ² , карат ²	19.0000	0.7210	36.1500	4.2600	8.1820
N42, шт					
V42 ² , карат ²	260.0000	0.0029	0.4380	0.0518	0.0560
N21, шт					
V21 ² , карат ²	374.0000	0.0001	0.0039	0.0008	0.0005
N105, шт					
V105 ² , карат ²	378.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000
N05, шт					
V05 ² , карат ²	339.0000	0.0000	0.0036	0.0000	0.0002
N805, шт					
V805 ² , карат ²	378.0000	0.0000	0.0200	0.0003	0.0014
N205, шт					
V205 ² , карат ²	378.0000	0.0000	0.0010	0.0001	0.0001

Таблица 3.9. Параметры расчета ошибок подсчета запасов для модели Пуассона

Основные составляющие для расчета систематической и случайной ошибок подсчета запасов на основе модели Пуассона

Класс	μ_K	μ_a	μ_{a^2}	$A(a)$	$B(a, \delta)$	$C(K, a, \delta)$	$D[P_b]$
84	0.050	1.7200	4.26000	1013.8800	383877.89	22.31	725837
42	1.390	0.2058	0.05180	12.3281	4667.68	8.88	245804
21	13.090	0.0280	0.00084	0.2000	75.72	1.55	38249
105	48.330	0.0040	0.00002	0.0040	1.51	0.12	2974
05	42.040	0.0006	0.00000	0.0007	0.27	0.00	434
805	62.857	0.0149	0.00032	0.0757	28.67	2.09	73112
205	61.418	9.15E-03	0.00009	0.0215	8.16	0.78	20739

Таблица 3.9 позволяет оценить вклад составляющих в случайную ошибку определения запасов в разведочном блоке и показывает преобладающее влияние слагаемого $B(a, \delta)$, значение которого практически полностью определяется вторым начальным моментом массы кристалла ($M[a^2] = D[a] + \mu_a^2$).

Сводка характеристик подсчета запасов для пуассоновской модели и модели содержаний (Таблица 3.10) показывает хорошую сходимость результатов расчетов по этим двум моделям, а также возможное завышение запасов для мелкой фракции алмазов.

Таблица 3.10. Запасы и ошибки их оценки в блоке для модели Пуассона

Запасы, систематическая и случайная ошибки в разведочном блоке объемом 100000 куб.м., рассчитанные по моделям содержаний и модели Пуассона

Класс	Запасы P , карат	Запасы по модели Пуассона μ_P , карат	Расхожде- ние $(P - \mu_P)$, карат	Относительн $(P - \mu_P)/\mu_P, \%$	Случайная	Случайная	Коэффи-
84	46 417	47 591	-1 174	-2.5	845	852	1.79
42	157 818	158 269	-451	-0.3	580	496	0.31
21	200 815	203 093	-2 278	-1.1	360	196	0.10
105	106 271	107 910	-1 640	-1.5	182	55	0.05
05	16 368	14 388	1 980	13.8	104	21	0.14
805	511 320	516 863	-5 543	-1.1	989	270	0.05
205	307 085	311 003	-3 918	-1.3	628	144	0.05

Результаты проведенных исследований позволили построить стохастическую модель случайно-неоднородной среды и получить выражения, позволяющие оценивать систематические и случайные ошибки подсчета запасов, связанные с результатами опробования. Данные расчетов по полученным формулам показывают, что фактические относительные систематические и случайные ошибки подсчетов запасов не превышают первых процентов. Следует подчеркнуть, что этот вывод справедлив только при фиксированной геометрии блока.

Важной задачей дальнейших исследований является практическое сравнение данных эксплуатации и разведки на основе предложенных моделей оценки точности запасов, сопровождаемое целенаправленной оценкой параметров пуассоновской модели на основе изучения гранулометрического состава кристаллов и учета фактической изменчивости объема проб.

Глава 4. Моделирование физико-механических свойств

4.1 ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО СОСТАВА КИМБЕРЛИТОВ

В связи с развитием горного производства алмазодобывающей промышленности, переходом к добыче алмазов на более глубоких горизонтах и в условиях подземной отработки месторождений, возникает необходимость расширенного и более глубокого изучения физико-механических свойств кимберлитов, определения их локального распределения в пространстве рудного тела, прогнозирования свойств горного массива. Такая необходимость тесно связана с оптимизацией параметров добычи алмазов по критерию сохранности, рациональным выбором направления ведения горных работ. В этом случае возникает вопрос о привлечении дополнительной информации, позволяющей производить прогнозирование и определение необходимых физико-механических свойств в заданных областях планируемой отработки месторождения.

Кимберлитовые трубки Якутской алмазоносной провинции весьма разнообразны по вещественному составу и геологическим условиям залегания. При этом физико-механические параметры слагающих их пород варьируют в очень широких пределах и имеют относительно высокую дисперсию. Наблюдаются весьма сложные взаимоотношения между составом кимберлитов различных фаз внедрения и их физическими свойствами, которые обусловлены, в первую очередь, внутренней энергией систем, а также влиянием внешних факторов (температура, давление, влияние внешних физических полей и т.д.). Физические свойства горных пород и даже геологических формаций, в принципе, являются функцией термодинамических условий их образования в различных слоях земной коры, условий плавления и кристаллизации магматического расплава, последующих условий метаморфизма.

Дополнительная информация о распределении тех или иных физических параметров по площади и в пространстве может быть обеспечена при использовании материалов петрографического анализа, проведенного на опорных горизонтах месторождения. Существуют определенные зависимости физических свойств горных пород от общего минерального и химического состава, структурно-текстурных особенностей, степени диагенеза и метаморфизма. Однако выделяемые геологические единицы часто характеризуются очень широким диапазоном изменения физических параметров. Известные формулы взаимосвязи физико-механических параметров имеют существенный недостаток, который заключается в том, что, при допустимом среднем значении расчетного признака в массиве, расчеты все же будут повторять распределение исходного параметра, то есть, практически все последующие расчеты, по сути являются производными от исходной функции. Подобные оценки допустимы при глобальных оценках массива, но недопустимы при определении локального распределения признака. На примере кимберлитового месторождения «Удачная» была разработана методика определения физико-механических свойств на основе петрографического анализа.

Как и в других кимберлитовых трубках Якутской алмазоносной провинции трубка «Удачная» в ее Западном и Восточном телах выполнена кимберлитовыми породами двух фаз внедрения: порфировыми кимберлитами и автолитовой кимберлитовой брекчией. Эти разновидности различаются между собой структурными особенностями основной массы, количеством и формой выделений оливина (или псевдоморфоз по нему), содержанием флогопита, химическим составом, насыщенностью ксеногенным (преимущественно осадочным) материалом и т.д. Взаимоотношение между породами выделенных фаз свидетельствует о существовании незначительного временного перерыва при их образовании. Автолитовая кимберлитовая брекчия Западного рудного тела окрашена в серые, светло-серые цвета, неравномерно

трещиноватая, отличается повышенным содержанием ксеногенного материала, составляющего до 70% объема породы. В подчиненном количестве в составе Западного рудного тела присутствует порфировый кимберлит в виде автолитов размерами от нескольких сантиметров до первых десятков метров, последние чаще всего приурочены к краевым частям рудного тела. Порфировый кимберлит темно-серого, голубовато-серого цвета, содержит ксеногенного материала порядка 8-10% объема породы, фенокристаллы представлены выщелоченными и окремненными псевдоморфозами кварц-карбонатного, карбонатного, серпентин-карбонатного состава.

Восточное рудное тело сложено преимущественно автолитовой кимберлитовой брекчией темно-серого, зеленовато-серого цвета с четкой порфировой структурой, массивной текстурой основной массы. В отличие от Западного рудного тела порфировые выделения в брекчии здесь представлены как свежим, слабо измененным оливином, так и псевдоморфозами по нему карбонат-серпентинового состава. Основная масса породы тонкозернистая, карбонат-серпентиновая, нередко насыщенная пылевидным магнетитом. Порфировый кимберлит в Восточном рудном теле распространен шире, чем в Западном. Вторичная минерализация фиксируется в основном только по трещинам и зеркалам скольжения и представлена в основном магнетитом, серпентином, кальцитом, кварцем и др. Кимберлиты восточного рудного тела отличаются сравнительно большей плотностью, крепостью и относительно свежим составом.

С целью выполнения прогнозных оценок на проектируемую глубину и для исследования петрографо-минералогических характеристик, физико-механических и других свойств кимберлитовых руд на опорных горизонтах кимберлитового месторождения выполнялся макропетрографический анализ керн кимберлитов, который заключался в подсчете в кимберлитах ксеногенного материала, оливина или псевдоморфоз по нему и иного материала, составляющего основу кимберлитов трубки «Удачная» в процентном соотношении к суммарному объему исследуемого керна.

На Рис. 4.1 представлены диаграммы петрографического состава кимберлитов в процентном соотношении отдельно по исследуемым горизонтам и по двум рудным телам.

Разработанная методика определения физико-механических свойств кимберлитовых руд по стандартному комплексу петрографического анализа основана на применении коэффициентов для каждого элемента анализа.

Метод может быть реализован для каждого компонента петрографического анализа и рассчитываемого признака. В данном методе рассчитываются именно свои коэффициенты, что дает возможность максимально приблизить расчетные данные к исходным значениям.

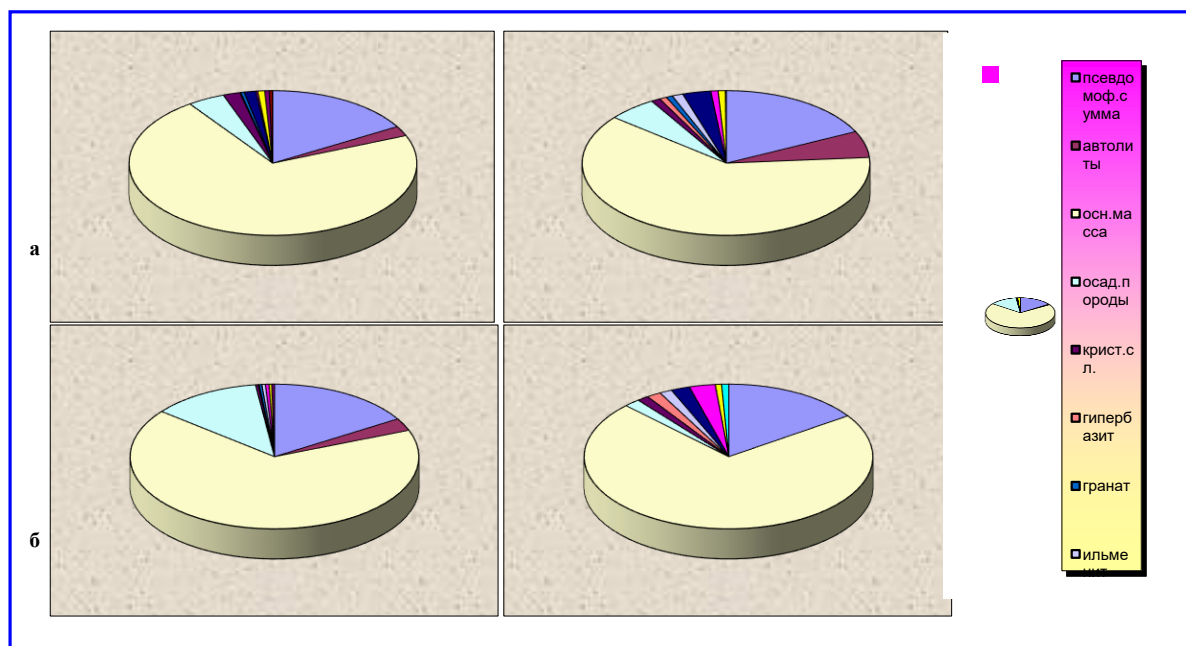
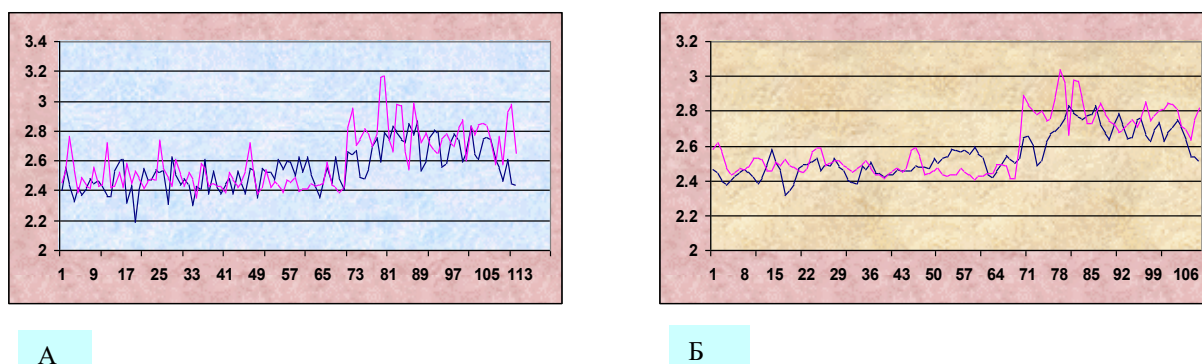


Рис. 4.1. Диаграммы петрографического состава кимберлитов в % к основной массе (слева-Западное тело, справа- Восточное тело): а - горизонт –65м; б - горизонт –125м

Необходимо отметить, что для надежного расчета коэффициентов необходимо достаточно большое количество исходных данных. То есть, точность аппроксимации зависит от размеров исследуемой выборки.

В результате расчетов были получены коэффициенты для каждого из элементов макропетрографического анализа. Причем нельзя отдать предпочтение одному или нескольким компонентам, участвующим в расчетах, поскольку, даже при отсутствии ярко выраженных корреляционных связей, каждый из них в той или иной степени косвенно влияет на конечный результат расчета исследуемого параметра, т. е. все компоненты действуют равноправно и независимо друг от друга, а интегральная характеристика агрегата является средневзвешенным значением из характеристик каждого компонента. Коэффициенты рассчитывались соответственно для каждого физико-технического параметра и для горизонта –125м. Рассчитанные коэффициенты были применены для определения физико-механических параметров горизонта –65м. Результаты расчетов приведены ниже в виде графиков и таблиц (Рис. 4.2, Таблица 4.1).



А

Б

Рис. 4.2. Распределение плотности кимберлитовых руд: А – экспериментальные данные и расчетные значения для горизонта –65м; Б – осредненные значения экспериментальных и расчетных данных для горизонта –65м.

По оси Х – порядковый номер пробы для данного горизонта, по оси Y – значения плотности (г/см³)

- Экспериментальные данные
- Расчетные данные

Результаты сравнения характеристик физико-механических параметров для горизонта –65м представлены в таблице №1. Недостаточно высокий коэффициент корреляции некоторых физических свойств объясняется малым количеством значений, принимающих участие в непосредственных расчетах и высоким значением дисперсии этих параметров.

Таблица 4.1. Результаты расчетов физико-механических свойств по горизонту -65м.

физико-механический параметр	Среднее значение		дисперсия		Экспериментальные данные		Расчетные данные	
	Эксперим.	Расчет.	Эксперим.	Расчет.	min	max	min	max
плотность	2.55	2.59	0.02	0.034	2.19	2.87	2.3	3.1
пористость	10.75	10.8	9.2	6.2	4.13	16	5.2	16.38
прочность на растяжение	3.23	3.22	1.20067	0.338327	1.08	5.9	2	5.4
прочность на сжатие	17.95	17.5	54.3652	16.61532	3.57	32.9	12.5	34.3
влажность	1.57	1.6	0.36935	0.235417	0.65	3.85	0.75	2.6
скорость пр.волны	3882	3836	82621.6	51580.86	3233	4690	3460	4770
коэфф.сцепления	7.07	6.8	1.5	0.44	4.2	9.9	5.7	9.2
коэфф. хрупкопластичности	7.71	7.85	3.54	1.78	4	15	5.5	14.5
угол сцепления	34.23	33.9	8.1	3.63	26.8	39.5	30.2	41.06

Сравнение данных, полученных расчетным методом и в ходе лабораторных исследований производились по критерию сходимости. Были построены модели как для исходных данных, так (с теми же параметрами расчетов) для рассчитанных методом коэффициентов плотностных характеристик и определенных для кимберлитов физико-механических параметров горизонта –65м (пористость, прочность на растяжение, прочность на сжатие, влажность, скорость продольной волны, коэффициент сцепления, коэффициент хрупкопластичности, угол сцепления). Коэффициент корреляции между результатами расчетов двух моделей по плотности более 80%, по влажности –93%, что является характеристикой достаточно высокой сходимости двух признаков расчетов. При анализе полученных результатов учитывались существующие допуски лабораторных испытаний образцов кимберлитов при принятых методиках определения параметра, а также период времени от взятия образцов до проведения лабораторного анализа исследуемой пробы. Отклонения расчетных значений и экспериментальных данных вызваны, в первую очередь, неучтенными факторами.

Существенным этапом проводимых исследований был вопрос о возможности решения обратной задачи: по данным физико-механических свойств определить петрографический состав кимберлитов (в процентном соотношении). Задача решалась с использованием плотностных характеристик и коэффициентов, определенных для

каждого элемента общего состава кимберлитов. Коэффициенты рассчитывались отдельно для Восточного и Западного рудного тела на одном из опорных горизонтов. Корреляция расчетных и фактических данных от 65 до 80%, за исключением элементов, имеющих очень низкий процент вклада в общем составе петрографического анализа (гипербазиты, сульфиды). На Рис. 4.3 отображены диаграммы фактических и расчетных значений петрографического состава изучаемого горизонта. Как видно из представленного рисунка, расчетные результаты и фактические данные имеют достаточно высокую сходимость, что позволяет применить подобные исследования при прогнозировании общего состава кимберлитов по физико-механическим свойствам.

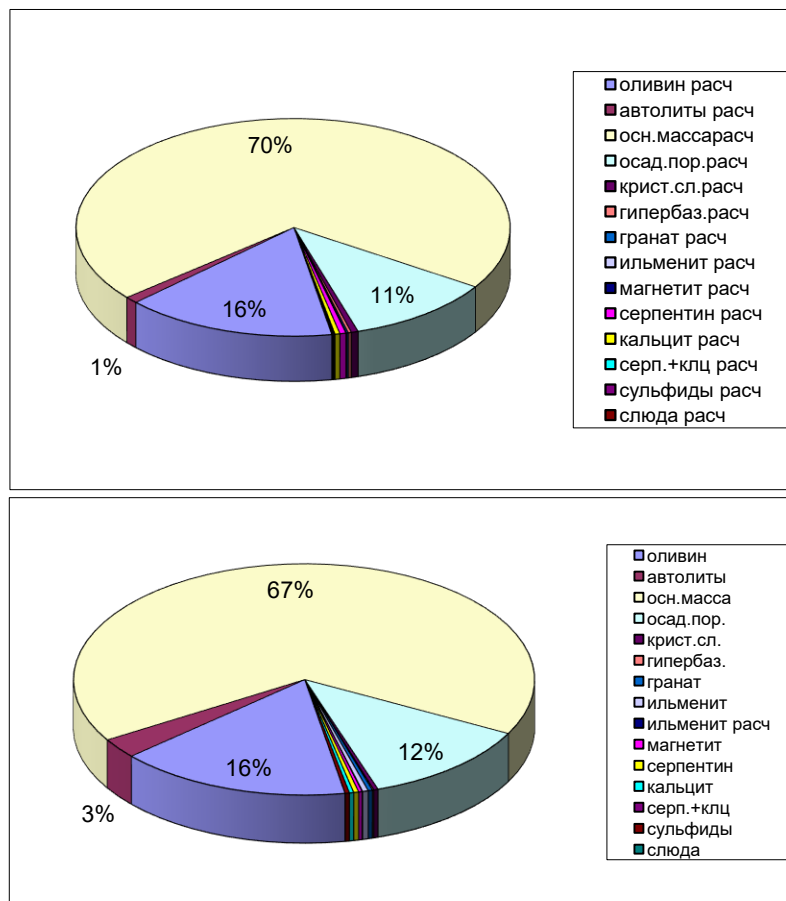


Рис. 4.3. Диаграммы расчетных (вверху) и фактических компонентов петрографического анализа исследуемого горизонта трубки «Удачная».

Необходимо отметить, что рассчитанные коэффициенты имеют субъективное значение и дают возможность применения на конкретном месторождении, для любого другого месторождения потребуются произвести предварительные расчеты.

Подобная методика расчета физико-механических свойств может найти применение при определении параметров на малоопробованных горизонтах, на горизонтах по каким либо причинам труднодоступных для проведения дополнительных работ по определению физических свойств горных пород, а также как один из дополнительных методов при планировании работ или построения моделей распределения физико-механических свойств горных пород.

4.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБКИ «ЮБИЛЕЙНАЯ» ДЛЯ РАЙОНИРОВАНИЯ ПО ВЗРЫВАЕМОСТИ.

На алмазоносных месторождениях АК «АЛРОСА» в исследовании геологических и структурных свойств горных пород приоритет по известным причинам принадлежит кимберлитовым рудам.

Погоризонтное районирование рудных тел по взрываемости основывается на материалах геологических изыскательских работ, лабораторных и полигонных исследованиях физико-механических свойств и результатов опытно-промышленных взрывов. На вскрышных породах районирование производится в основном на основе систематизации геологических данных и физико-механических свойств горных пород вскрытых горизонтов и результатах опытно-промышленных взрывов.

С появлением компьютерной техники и мощных специализированных программ типа Datamine стало возможным более детальное разделение рудных тел на типичные районы по любым заданным критериям. На вскрышных породах такого положения дел можно будет достичь после выполнения определенного объема геологических изыскательских работ.

Основным критерием качества БВР является кусковатость взорванной горной массы или фракционный состав, отражающий процентное содержание условно разделенных по размерам кусков горных пород, который в известных пределах управляется параметрами БВР.

Главной задачей районирования карьерного поля по взрываемости, как и прежде, остается оптимизация показателей горно-обогатительных процессов за счет обеспечения качества взрывных работ. Практическое применение заключается в разработке и использовании типовых паспортов БВР, соответствующих ожидаемому гранулометрическому составу взорванной горной массы для каждого выделенного района. Обычно на одном технологическом блоке используются одни параметры, т.е. один удельный расход ВВ, одна сетка скважин и т. д. С развитием автоматизации управления технологическими процессами ведётся районирование горных пород по взрываемости по всему месторождению.

Учитывая различные физико-механические свойства вмещающих и перекрывающих пород, а также кимберлитов, для создания достоверной модели по распределению параметров физико-механических свойств месторождения «Юбилейная» на первом этапе была создана блочная геологическая модель. Геологическая модель имеет пространственную привязку к фактическим координатам и абсолютным отметкам. Для более детальной представительности геологическая модель имеет размеры блоков 10х10х10м (обычно применяется размер 20х20х20) и более мелкие блоки при необходимой геометризации геологических разновидностей. Геологическая модель создавалась на основе геологических разрезов, планов, данных по геологическим колонкам и материалам. По геологическим разрезам и планам рассчитывались каркасные модели, производилась необходимая геологическая интерпретация данных и для каждой разновидности геологического возраста создавалась своя блочная модель. После объединения в единый файл производилась редакция полученной модели с целью исключения возможных ошибок. При соответствии полученных результатов существующим разрезам и геологическим данным по скважинам, блочная модель принималась к дальнейшему использованию.

Создана база данных по вмещающим породам на основе кадастра физико - механических свойств вмещающих пород и база данных физико - механических свойствам кимберлитов на основе результатов кернового бурения (эксплоразведка). По полученным данным созданы модели физико-механических свойств кимберлитовых тел. К сожалению, кадастр физико-механических свойств вмещающих пород несет весьма обобщенные данные (интервал обобщения 100-500м), не учитывая различные

геологические границы, тектонические нарушения, трещиноватость и углы падения вмещающих пород. Поэтому отдельно была создана геологическая модель, где каждой разновидности вмещающих и перекрывающих пород был присвоен свой индекс (код). Таким образом, обобщенная модель представлена геологической моделью вмещающих пород и моделью рудного тела по физико-механическим свойствам (Рис. 4.4).

Учитывая различные физико-механические свойства вмещающих и перекрывающих пород, а также кимберлитов, для создания достоверной модели по распределению параметров физико-механических свойств месторождения «Юбилейная» на первом этапе была создана блочная геологическая модель. Геологическая модель имеет пространственную привязку к фактическим координатам и абсолютным отметкам. Для более детальной представительности геологическая модель имеет размеры блоков 10х10х10м (обычно применяется размер 20 х 20 х20) и более мелкие блоки при необходимой геометризации геологических разновидностей. Геологическая модель создавалась на основе геологических разрезов, планов, данных по геологическим колонкам и материалам отчетов. По геологическим разрезам и планам рассчитывались каркасные модели, производилась необходимая геологическая интерпретация данных и для каждой разновидности геологического возраста создавалась своя блочная модель. После объединения в единый файл производилась редакция полученной модели с целью исключения возможных ошибок. При соответствии полученных результатов существующим разрезам и геологическим данным по скважинам, блочная модель принималась к дальнейшему использованию.

Создана база данных по вмещающим породам на основе кадастра физико-механических свойств вмещающих пород и база данных физико - механических свойствам кимберлитов на основе результатов кернового бурения (эксплоразведка). По полученным данным созданы модели физико-механических свойств кимберлитовых тел. К сожалению, кадастр физико-механических свойств вмещающих пород несет весьма обобщенные данные (интервал обобщения 100-500м), не учитывая различные геологические границы, тектонические нарушения, трещиноватость и углы падения вмещающих пород. Поэтому отдельно была создана геологическая модель, где каждой разновидности вмещающих и перекрывающих пород был присвоен свой индекс (код). Таким образом, обобщенная модель представлена геологической моделью вмещающих пород и моделью рудного тела по физико-механическим свойствам (Рис. 4.4).

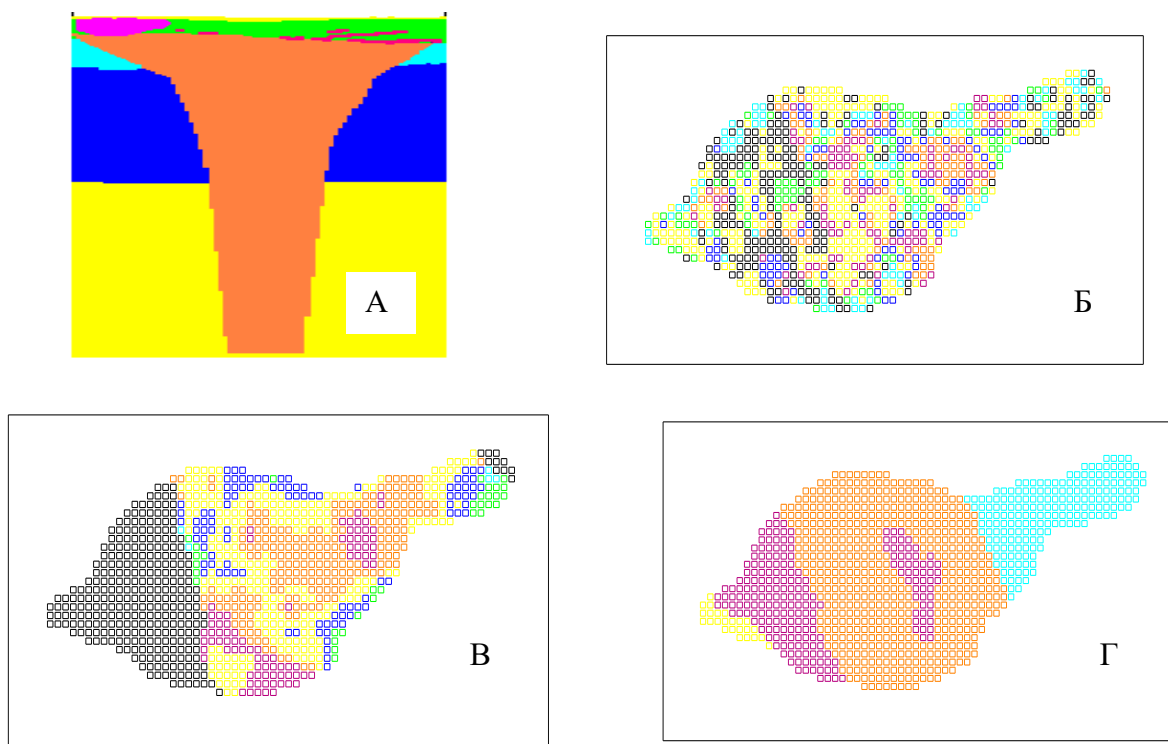


Рис. 4.4. Блочная модель трубки «Юбилейная» на горизонте 530м
 А – геологическая модель вмещающих и перекрывающих пород, Б – модель по плотности, В – модель по крепости, Г – модель по геологическим блокам.

Необходимо отметить слабую изученность вмещающих пород околорудного пространства кимберлитовых тел. Так, для тр. «Юбилейная» было проведено 243 испытания для изучения физико-механических свойств вмещающих пород, однако практически все эти испытания определены для глубины 500 и более метров от дневной поверхности. Для верхних горизонтов существуют данные только для 12 скважин, часть из которых изучены с глубины 300 м, часть пройдена в районе кимберлитового тела. Недостаточно изучены вопросы трещиноватости вмещающих пород, хрупкопластичности, крепости.

На основе созданной базы данных была построена модель распределения физико-механических свойств в пределах рудного тела и вмещающих горных пород с учетом фактически отработанного объема и планируемого развития карьера. Модель создавалась методом интерполяции отдельно для рудного тела и отдельно для вмещающих пород с различными расчетными радиусами. Отличие в методах расчетов физико-механических свойств вызвано, в первую очередь, объемом исходных данных (наличие достаточно представительной выборки для рудного тела и недостаток данных для околорудного пространства). Учитывая развитие различных типов перекрывающих и вмещающих пород, полученная модель была отредактирована в соответствии с существующим кадастром физико-механических свойств вмещающих пород. Редактирование производилось на основе ранее созданной геологической модели месторождения.

Коэффициент корреляции между плотностью и крепостью горных пород (общий коэффициент для всей модели) составляет 51%. Тем не менее, нельзя не отметить некоторую обобщенную взаимосвязь этих параметров. На рис.2 представлены данные по крепости и плотности горных пород и кимберлитов. В верхней части разреза существуют различные типы перекрывающих пород (силурийского, пермского возраста, долериты и т.д.), именно этим объясняется достаточно широкий разброс взаимосвязи

параметров, кроме этого нельзя не отметить различные типы кимберлитов (2-й, 3-й и 4-й геологические блоки), имеющие существенные различия по физико-механическим свойствам кимберлитов.

На Рис. 4.5 построены гистограммы по крепости и плотности горных пород. Анализ гистограмм дает возможность выделить несколько петрофизических типов горных пород, соответствующих двум типам кимберлитов (2 блок и 3-4 геологический блок), а также двум типам породы (вмещающие и перекрывающие соответственно).

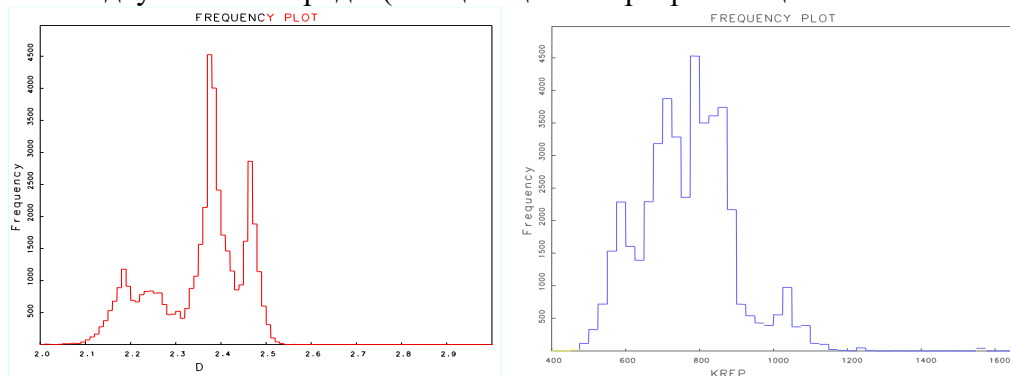


Рис. 4.5. Гистограмма распределения проб по плотности и крепости горных пород

Таким образом, созданная модель дает возможность получить распределение в пространстве физико-механические свойства кимберлитов и вмещающих пород.

На основе полученной модели отстроены графические материалы погоризонтно через 15 м от поверхности рудного тела до начала планируемой отработки карьера (Рис. 4.6, Рис. 4.7).

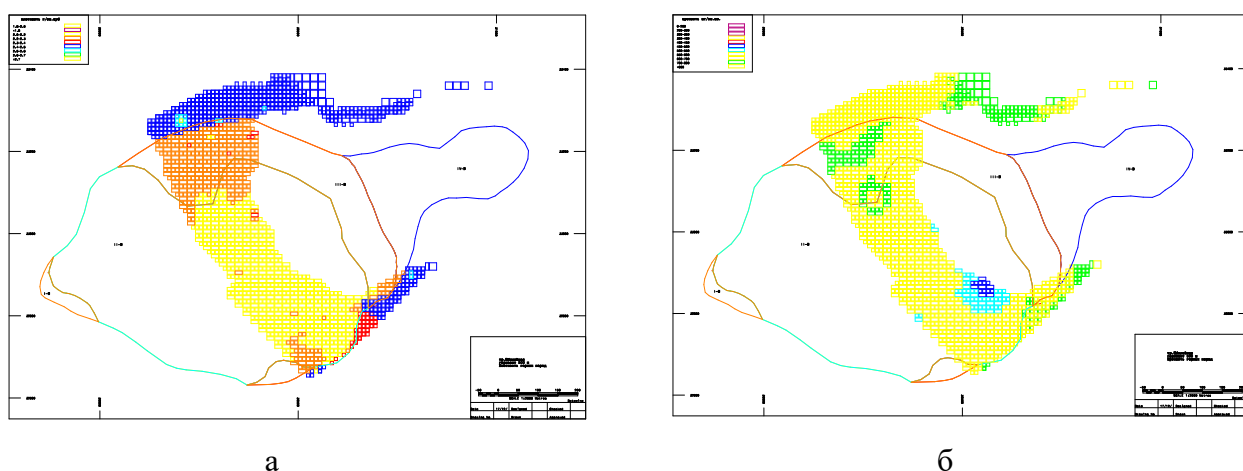


Рис. 4.6. Пример распределения физико-механических параметров для горизонта 500 м по плотности (а) и крепости (б) горных пород.

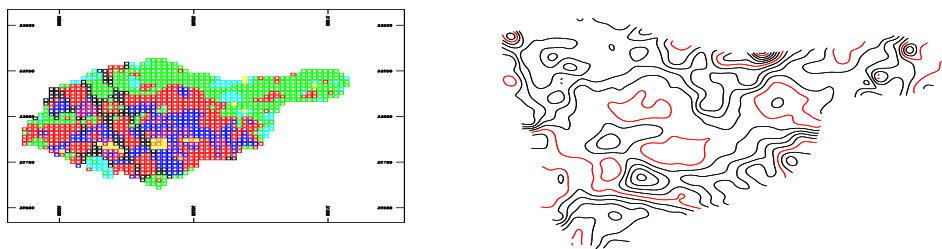


Рис. 4.7. Вывод графики - блочная модель (слева),
изолинии физико-механических свойств (справа).

4.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБКИ «НЮРБИНСКАЯ» ДЛЯ РАЙОНИРОВАНИЯ ПО ВЗРЫВАЕМОСТИ.

Для анализа исходных данных использовались данные геологических отчетов и результаты исследований института «Якутнипроалмаз». Основными параметрами, влияющими на выбор удельного расхода ВВ, являются крепость и плотность горных пород, их изменчивость в соответствии с типом (литологической разновидностью пород) и изменчивостью в плане и с глубиной.

Следует отметить, что вмещающие и перекрывающие горные породы исследованы крайне слабо, те данные, которые существуют, зачастую не имеют координатной привязки и не могут быть применены для подобных исследований.

В основном исходные данные приурочены к рудному телу (результаты эксплоразведки и детальной разведки месторождения).

Ниже приведены статистические данные физико-механических свойств по рудному телу трубки «Нюрбинская».

Нельзя отметить наличие какой-либо четкой взаимосвязи и коррелируемости плотности и крепости (Рис. 4.8). Исходные данные характеризуются разбросом значений, как между собой, так и с глубиной исследований. Тем не менее, по отстроенной карте пород, где по оси X и Y отложены значения плотности и абсолютной отметки опробования физико-механических свойств, нельзя не отметить наличие анизотропности, проявляющейся с увеличением глубины и повышением плотностных характеристик руды (Рис. 4.9). Таким образом, существует некоторая взаимосвязь, обусловленная увеличением крепости и плотности пород с увеличением глубины залегания

Таблица 4.2. Показатели плотности и крепости руд

Статистические данные по плотности рудного тела						
Мин. значение	Макс. значение	Ср. значение	Ст. отклонение	Ст. ошибка	Медиана	Дисперсия
2.02	2.47	2.22	0.111	0.013	2.22	0.0124
Статистические данные по крепости рудного тела						
2.8	24.1	8.76	4.67	0.571	8.03	21.84

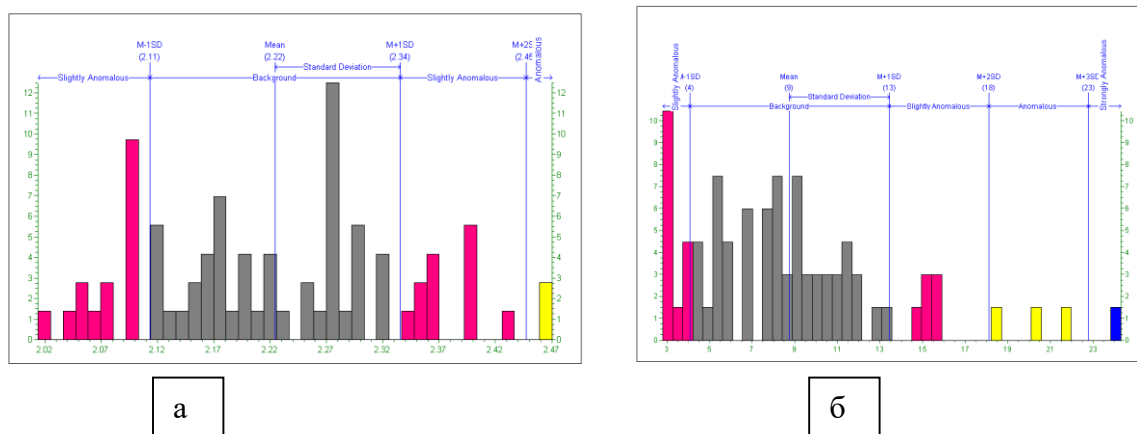


Рис. 4.8. Гистограммы по плотности (а) и крепости (б) кимберлитов

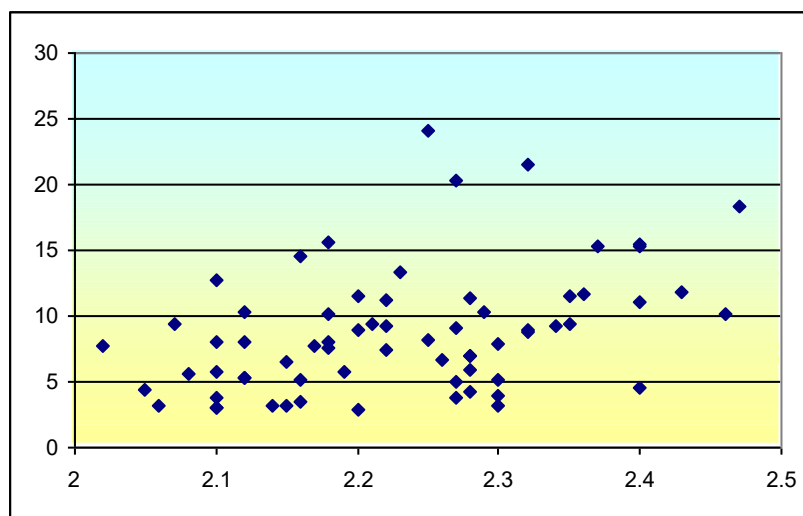


Рис. 4.9. Диаграмма по плотности и крепости рудного тела трубки "Нюрбинская"

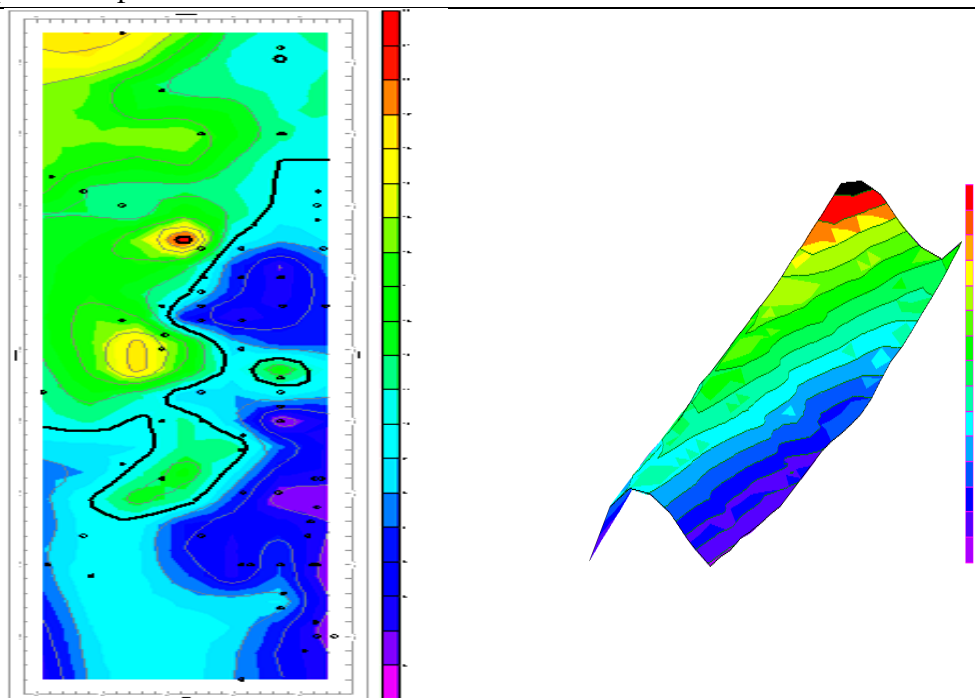


Рис. 4.10. Карта распределения крепости, где по оси X - абсолютная отметка, по оси Y- плотность рудного тела трубки «Нюрбинская»

Дальнейшие исследования были направлены на изучение физико-механических свойств вмещающих и перекрывающих пород. На Рис. 4.11 представлен геологический разрез (линия 32).

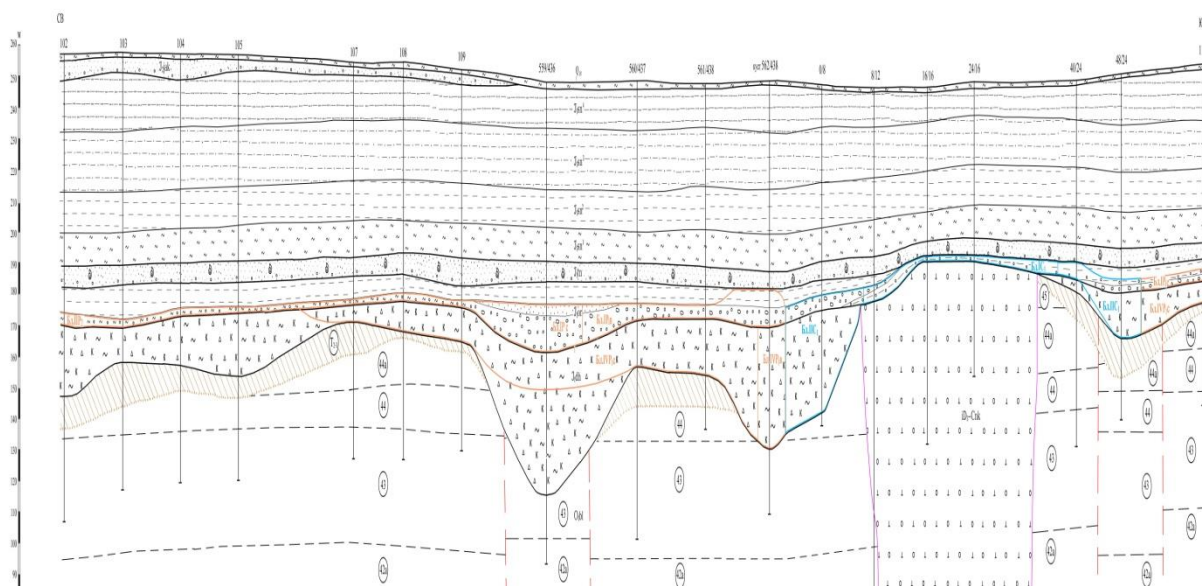


Рис. 4.11. Геологический разрез по трубе «Нюрбинская» (линия 32)

В соответствии с геологическим строением, изучение физико-механических свойств проводилось отдельно для перекрывающих и вмещающих горных пород. Перекрывающие отложения представлены в основном юрскими образованиями (песчаники, алевролиты). Отличительной особенностью этих отложений является наличие корреляционной связи между объемным весом и пористостью горных пород (коэффициент корреляции составляет 79%). На Рис. 4.12 представлена диаграмма по объемному весу и пористости (в%) перекрывающих отложений. Данных по крепости перекрывающих горных пород, к сожалению, недостаточно для выявления зависимостей и взаимосвязи физико-механических свойств.

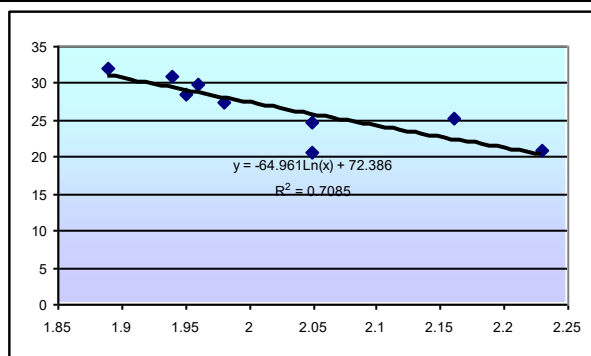


Рис. 4.12. Диаграмма по объемному весу и пористости (в%) перекрывающих отложений

Вмещающие отложения олдондинской свиты (O1ol) представлены в основном доломитами, известняками, алевролитами. На Рис. 4.13 представлена диаграмма зависимости крепости и объемного веса для отложений олдондинской свиты. Отмечается, что при увеличении значений объемного веса, существует закономерная тенденция повышения значений крепости горных пород, при этом коэффициент корреляции составляет 73%.

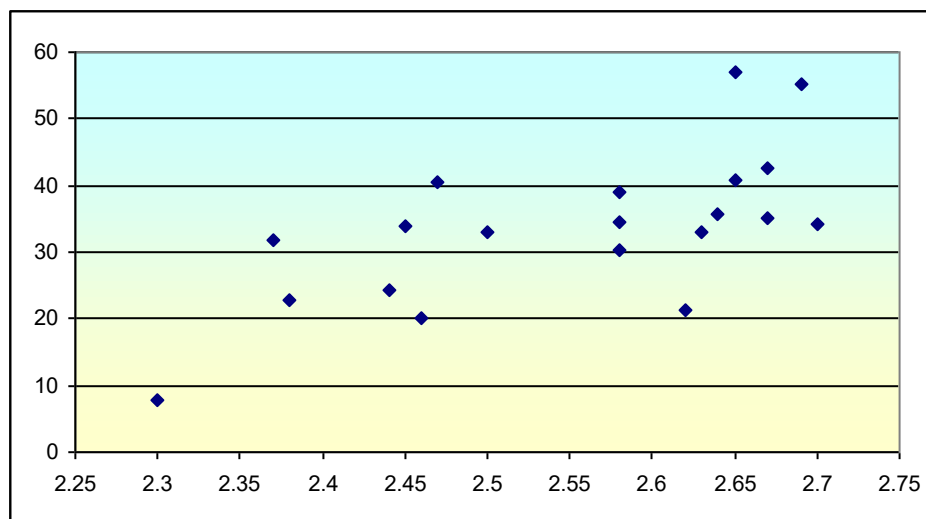


Рис. 4.13. Диаграмма по объемному весу и крепости горных пород отложений олдондинской свиты

Вмещающие отложения моркокинской свиты (С3mrk) характеризуются относительно невысоким коэффициентом корреляции (59%) и, соответственно большим разбросом данных на диаграмме по объемному весу и крепости горных пород (Рис. 4.14).

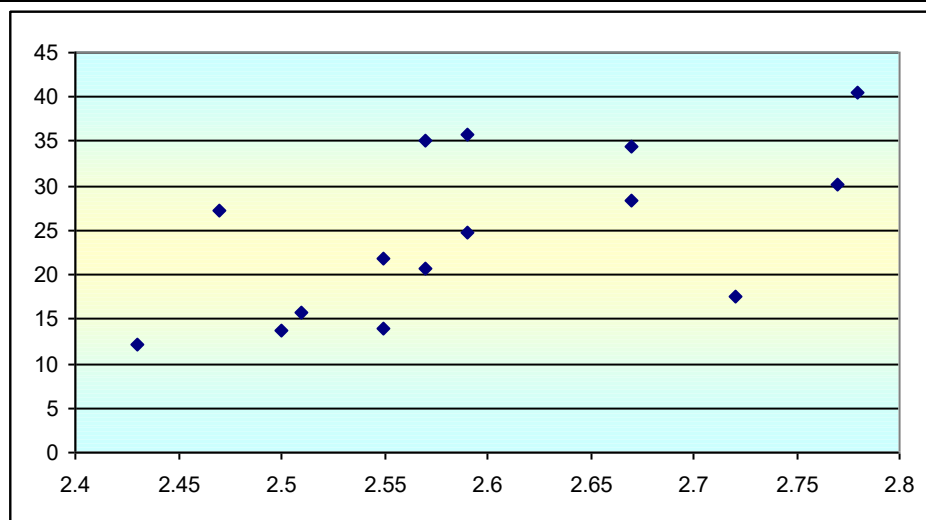


Рис. 4.14. Диаграмма по объемному весу и крепости горных пород отложений морокинской свиты

Поскольку вмещающие и перекрывающие горные породы представлены различными по своему составу породами, дополнительно были проведены исследования для литологических разностей, представляющих эти отложения. На рис. 11-13 отображены диаграммы данных физико-механических свойств для алевролитов и их разновидностей, доломитов и известняков, а также для песков, представленных в геологическом строении.

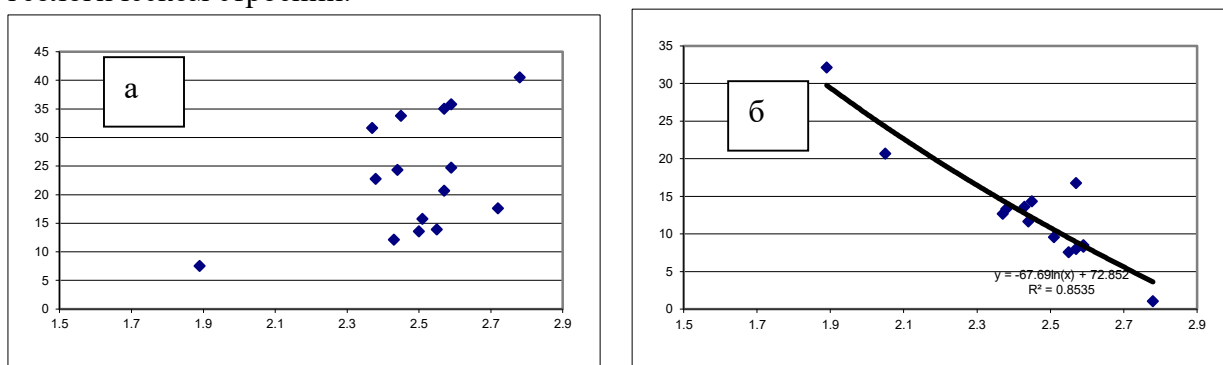


Рис. 4.15. Диаграмма по объемному весу и крепости (а) и по объемному весу и пористости (б) для алевролитов.

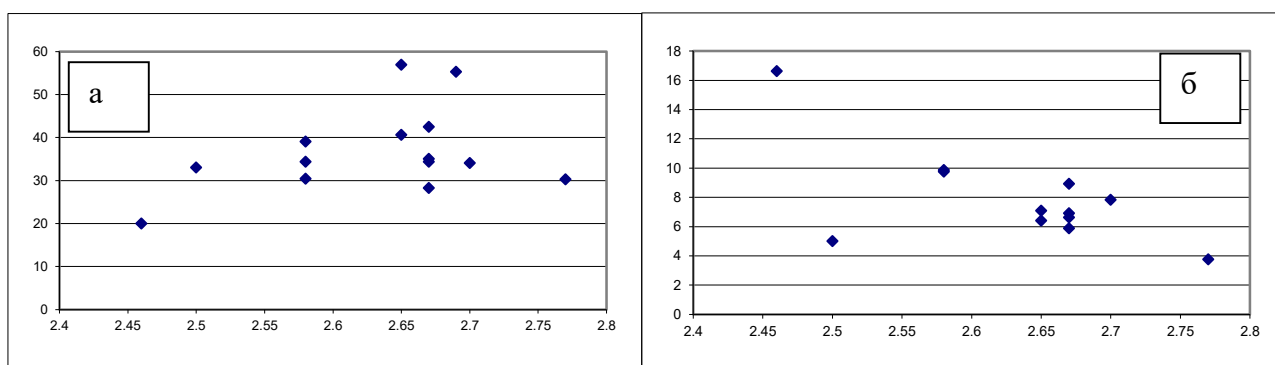


Рис. 4.16. Диаграмма по объемному весу и крепости (а) и по объемному весу и пористости (б) для доломитов и известняков

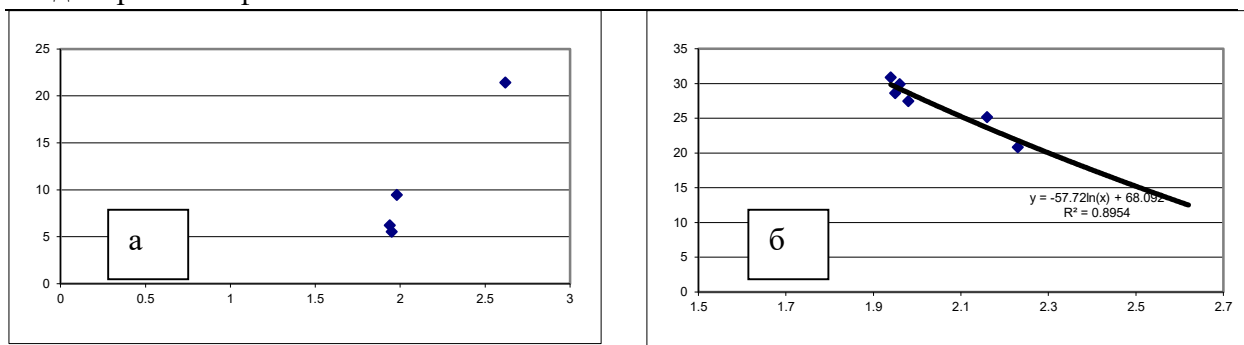


Рис. 4.17. Диаграмма по объемному весу и крепости (а) и по объемному весу и пористости (б) для песков.

Для создания геолого-математической модели месторождения первоначально создавалась геологическая модель вмещающих и перекрывающих рудное тело горных пород. Модель создавалась на основе геологических разрезов, планов, отчетных данных и материалов, полученных в результате бурения геологоразведочных скважин. Геолого-математическая модель рудных тел формировалась с учетом выделенных геологических блоков. Следующим этапом построения общей модели месторождения было создание модели россыпных месторождений. Каждому типу пород и геологическому блоку присвоен код зоны. Последующее объединение созданных моделей в единую, с учетом топографической поверхности, позволило получить конечную геолого-математическую модель месторождения тр. "Нюрбинская". Учитывая различные физико-механические свойства вмещающих и перекрывающих пород, а также кимберлитов, для создания модели по распределению параметров физико-механических свойств месторождения тр. «Нюрбинская» блочная модель имеет размеры блоков 5х5х5м и более мелкие блоки для геометризации геологических разновидностей.

Геологическая модель создавалась на основе геологических разрезов по линиям, а также с учетом эксплоразведочных скважин и скважин глубокой разведки. На основе созданной базы данных была создана модель распределения физико-механических свойств в пределах рудного тела и вмещающих горных пород с учетом фактически отработанного объема и планируемого развития карьера на 2005.г. Для создания модели на период развития карьера в 2005г. были введены и построены модели карьеров на периоды фактического состояния на 01.01.2005г и ожидаемый карьер на 01.01.2006г., которые и являются границами общей модели месторождения.

Модель создавалась методом интерполяции отдельно для рудного тела и отдельно для вмещающих пород с различными расчетными радиусами. Отличие в методах расчетов физико-механических свойств вызвано, в первую очередь, объемом исходных данных (наличие достаточно представительной выборки для рудного тела и недостаток данных для околорудного пространства).

Таким образом, созданная модель дает возможность получить распределение в пространстве физико-механические свойства кимберлитов и вмещающих пород. На Рис. 4.18 - Рис. 4.20 представлены примеры моделирования месторождения по физико-механическим свойствам горных пород.

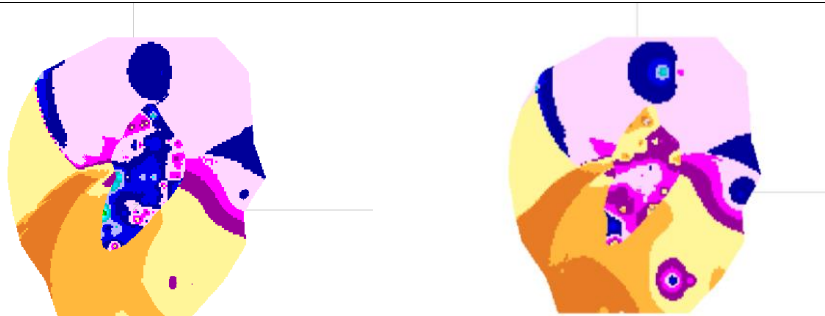


Рис. 4.18. Модель рудного тела и вмещающих горных пород по плотности на различных горизонтах



Рис. 4.19. Модель рудного тела по крепости на различных горизонтах

В соответствии с типом горных пород, плотностью и крепостью была создана модель по удельному расходу ВВ. Модель создавалась с учетом литологических разновидностей пород.



Рис. 4.20. Модель, составленный по удельному расходу ВВ

Результатом проведенных работ является блочная модель, описывающая физико-механические свойства и геологическое строение месторождения (Рис. 4.11). При расчете физико-механических свойств (плотность, крепость) применяются геостатистические методы.

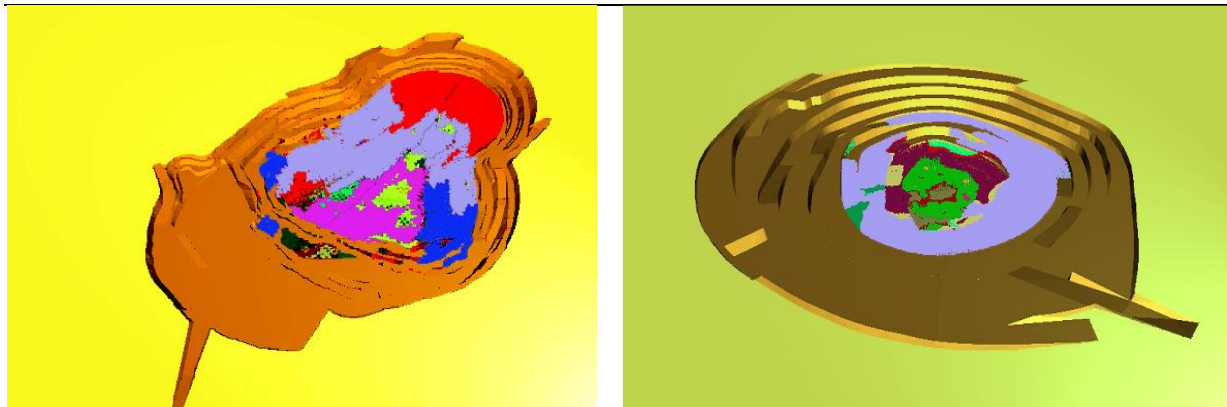


Рис. 4.21. Модели месторождений по удельному расходу взрывчатых веществ (слева - трубка Юбилейная, справа – трубка Ньюбинская).

Набор серий планов по объемному весу, крепости, плотности и типизации пород дает возможность их применения для оптимизации параметров буровзрывных работ. Для этого создается блочная модель месторождения по удельному расходу взрывчатых веществ, учитывающая расчетные значения физико-механических свойств и литологический состав горных пород и кимберлитов (Рис. 4.21).

Глава 5. Построение моделей кимберлитовых месторождений

5.1 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «НЮРБИНСКАЯ»

Трубка «Нюрбинская» была открыта геологами Ботуобинской экспедиции в начале 1996г. По пространственному расположению она находится в пределах истока ручья Дяхтар-Юреге, левого притока р.Марха, залегает в пределах распространения ренне-среднеюрских осадочных пород Сунтарской свиты (J1-2 sn) и относятся числу кимберлитовых тел, не выходящих на дневную поверхность.

Трубка «Нюрбинская» находится на водоразделе р.Ханья и р.Накын в пределах осевой линии Дяхтарского разлома, в зоне которого на юге расположена трубка Ботуобинская. Обе эти трубки относятся к числу погребенных кимберлитовых тел. Мощность перекрывающих отложений трубки Нюрбинская составляет 57-61м. В вертикальном разрезе морфология трубки близка к диатреме с каналом цилиндрического типа. Углы падения контактов трубки изменяются от относительно пологих (75-80°) до субвертикальных (85-87°). Рудное тело трубки сложено автолитовой кимберлитовой брекчий. Характер поперечного сечения постепенно изменяется в зависимости от глубины залегания рудного тела и характеризуется относительно постепенным убыванием площади поперечного сечения трубки от верхних частей к основному трубочному каналу. Это подтверждается бурением, так если на уровне палеоэрозионного среза трубка имеет сечение 300-320х130-160 м., то на глубине порядка 110 м., от уровня палеоэрозионного среза, уже 270х110 м., т.е. с глубиной контуры трубки конформно повторяют контуры верхних сечений, при этом, уменьшаясь в размерах соответственно углу конусности. На более низких глубинах, начиная со 150м и до глубин порядка наблюдается более устойчивое вклинивание рудного тела, углы контактов изменяются на более пологие.

Разведочными работами установлено, что трубка прорывает осадочные породы верхнего кембрия Мархинской свиты (E3 mr), нижнего ордовика Олдондинской свиты (O1 ol) и перекрывается ранне, ренне-среднеюрскими осадочными породами Тюнгской (J1 tn) и Сунтарской (J1-2 sn) свит. Мощность перекрывающих отложений 51-61м. Вмещающие породы Нюрбинской кимберлитовой трубки представлены осадочными породами верхнего кембрия мархинской свиты (E3 mr) и согласно залегающими на них осадочными породами нижнего ордовика олдондинской свиты (O1 ol).

По предварительным данным геологоразведочных работ установлено, что кимберлитовая трубка Нюрбинская имеет сложное многофазовое строение. Наличие включений одних разновидностей брекчий в другие, а также "зон смешивания" в области контактов разных типов пород, позволяет говорить об неоднократном внедрении выделяемых типов кимберлитов, слагающих трубку. В частности, анализируя состав кимберлитовых пород можно предположить сложный характер процессов внедрения тела трубки во вмещающие породы и выделить две фазы внедрения: субвулканическую (I фаза внедрения) и вулканическую (II фаза внедрения) характеризующихся каждая своим типом пород.

Кимберлитовые породы первой, субвулканической, фазы внедрения представлены дайками северо-восточного простирания, выполненными порфировыми кимберлитами. Содержание в них ксеногенного материала пород рамы редко достигает 5-7%.

Вторая, вулканическая, фаза внедрения отвечает, собственно за становление диатремовой части трубки и представлена автолитовыми кимберлитовыми брекчиями.

В первую стадию была образованна система трещин и возникшая при этом ослабленная зона была заполнена порфировыми кимберлитами. На участках незначительного растяжения образовались отдельные дайки или серии даек небольшой мощности (первые десятки сантиметров). Подъем кимберлитового вещества первой фазы внедрения носил характер вязкого течения с постепенной дегазацией. По завершении первой стадии проницаемые трещины были заполнены порфировыми кимберлитами, другие уплотнены до полной непроницаемости.

Во вторую стадию произошло формирование диатремы, в настоящее время выполненной породами автолитовый кимберлитовой брекчии. Последующие внедрения флюида продолжали разрабатывать уже сформировавшейся канал цилиндрической формы, увеличивая его поперечное сечение, особенно в верхних частях и придавая ему коническую форму. После завершения вулканической деятельности данная кимберлитовая трубка подверглась интенсивным процессам денудации, в результате чего верхние горизонты вмещающих пород и трубки были полностью размыты. В дальнейшем кимберлитовое тело было полностью захоронено под терригенными породами раннего мезозоя.

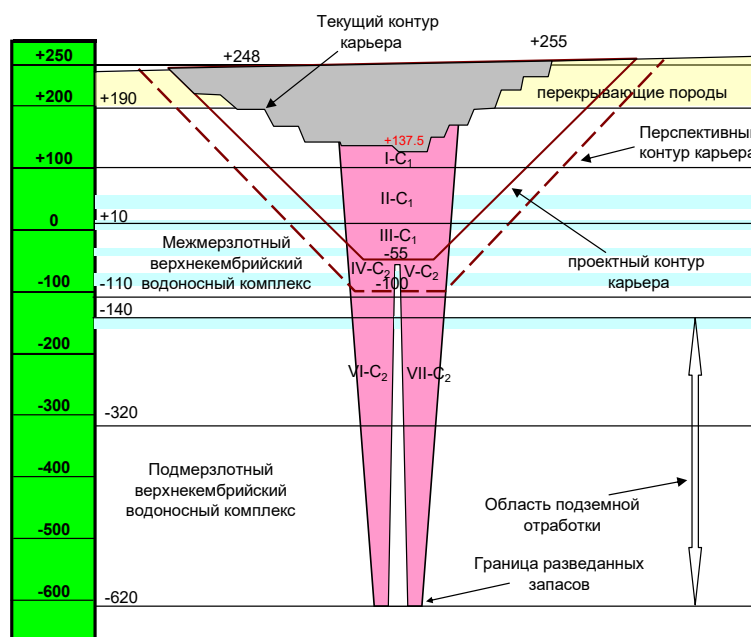


Рис. 5.1. Схема отработки месторождения трубка «Нюрбинская»

База данных для создания геолого-математической модели месторождений тр. «Нюрбинская» представляет собой следующий набор данных:

- топографическая поверхность;
- контуры рудного тела;

- каркасные модели рудных тел и выделенных геологических блоков;
- геологические разрезы по линиям;
- результаты кернового и валового опробования;
- координаты устьев скважин и данные инклинометрии;
- результаты кернового опробования с координатной привязкой каждой пробы;
- план продуктивного горизонта (балансовых песков), кровля, подошва и геологическая блокировка россыпных месторождений;
- каркасная модель проектного контура карьера.
- каркасные модели разновидностей перекрывающих и вмещающих горных пород.

Блочная геолого-математическая модель месторождения состоит из прямоугольных ячеек с размерами 15х15х20м. Для более достоверного описания геологического строения и самого рудного тела, прямоугольные ячейки были разбиты на подъячейки на границах контактов горных пород и в случае сложного морфологического строения. Содержания алмазов в пределах рудного тела и россыпного месторождения соответствует данным ГКЗ, плотность разновидностей горных пород и выделенных геологических блоков соответствует отчетным данным. Расчет объемов рудного тела и горной массы рассчитывались как сумма объемов каждой элементарной ячейки. Запасы руды и горной массы рассчитывались как сумма произведений объема в метрах кубических на плотность пород ячеек блочной модели. Каждая элементарная ячейка кроме координат (X, Y, Z) имеет геологическую кодировку, значение содержания алмазов, запасы в каратах, значение плотности, объем в м³ и массу в тоннах. Верхняя граница созданной модели ограничена топографической поверхностью, нижняя – глубиной разведки месторождения. Расчетные значения запасов геологических блоков рудного тела и запасов россыпного месторождения очень хорошо согласуются с отчетными данными. Для создания базы данных, расчета и создания модели была использована программа Datamine.

Для создания геолого-математической модели месторождения первоначально создавалась геологическая модель вмещающих и перекрывающих рудное тело горных пород. Модель создавалась на основе геологических разрезов, планов, отчетных данных и материалов, полученных в результате бурения геологоразведочных скважин. Перекрывающим и вмещающим горным породам, в соответствии с полученными данными, были присвоены значения плотности. Геолого-математическая модель рудных тел формировалась с учетом выделенных геологических блоков, где каждому были присвоены данные по содержанию алмазов и плотности. Следующим этапом построения общей модели месторождения было создание модели россыпных месторождений, которым также были присвоены значения содержаний алмазов и физико-механических свойств (в соответствии с выделенными блоками и данными опробования). Каждому типу пород и геологическому блоку присвоен код зоны. Последующее объединение созданных моделей в единую, с учетом топографической поверхности, позволило получить конечную геолого-математическую модель месторождения трубка «Нюрбинская»

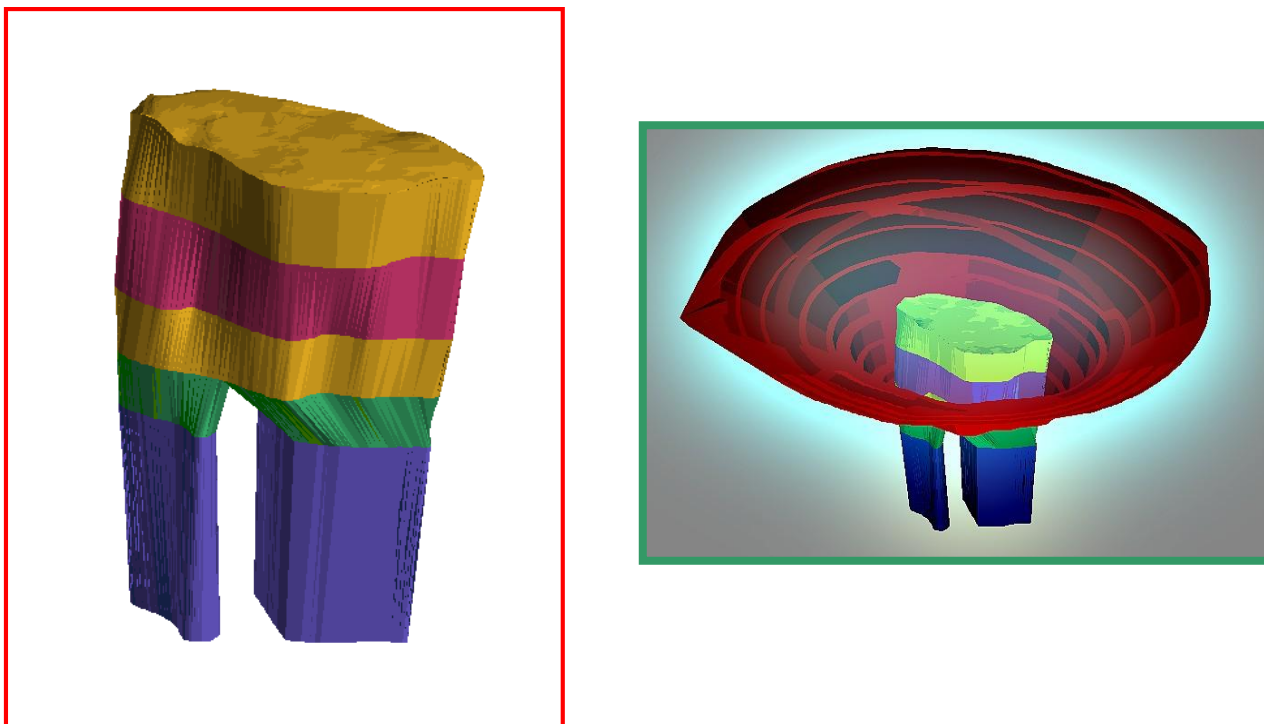


Рис. 5.2. Каркасная модель рудного тела трубки Нюрбинская (слева) и проектного контура карьера (справа) с рудным телом

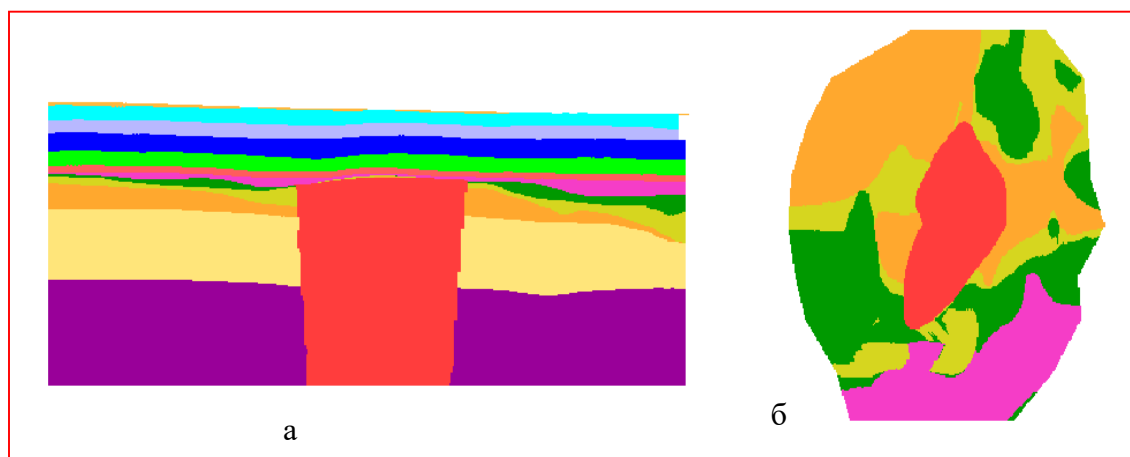


Рис. 5.3. Блочная геологическая модель рудного тела трубки «Нюрбинская» (различным цветом выделены стратиграфические разновидности горных пород):
а – вертикальный разрез; б – горизонтальный разрез (абс. отметка 175м)

Для более достоверного представления были построены поверхности рудного тела месторождения. Поверхности рудного тела отстраивались по данным геологических разрезов, планов и литологических данных. Подсчет объемов производился по созданным каркасным и блочным моделям для каждого геологического блока.

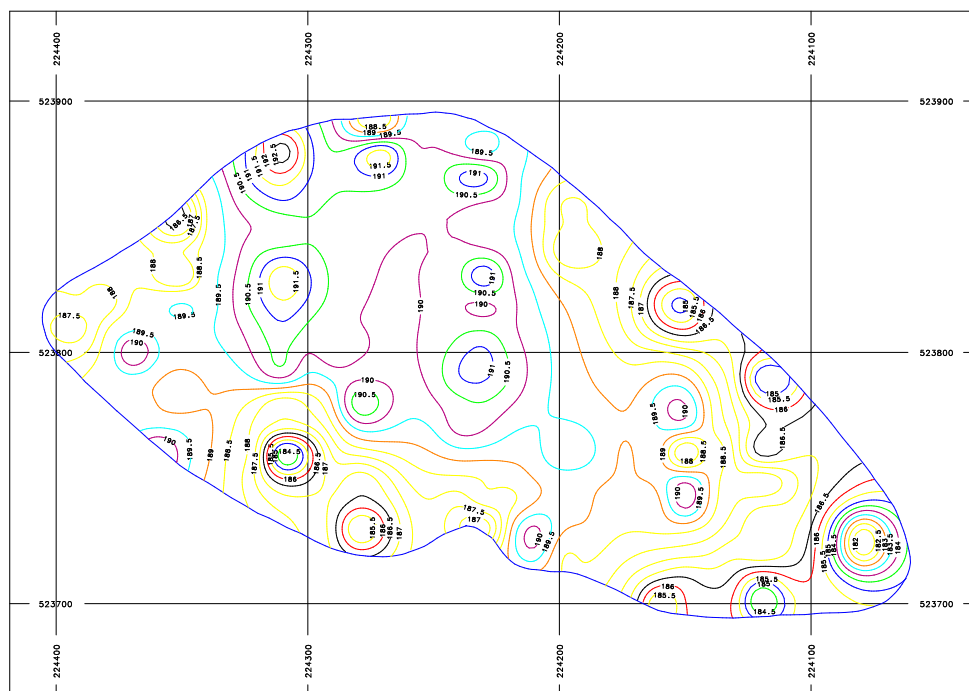


Рис. 5.4. План изолиний поверхности рудного тела трубка «Нюрбинская»

Для расчета пространственных координат точек опробования были использованы файлы координат устьев скважин, файлы инклинометрии, файлы опробования и файлы литологии, где каждой разновидности кимберлитов был присвоен свой цифровой код (формализация разновидностей).

Геостатистический анализ исходных данных выявил ряд сложностей, нехарактерных для ранее открытых кимберлитовых месторождений. То есть месторождения алмазов Накынского кимберлитового поля несут некоторую отличительную особенность, проявляющуюся в первую очередь в пространственном распределении содержания алмазов. Так для трубки «Нюрбинская» характерны достаточно высокие значения содержания в верхней части рудного тела в пределах 15-20 метрового слоя, связанной с интенсивно выветрелой корой выветривания кимберлитов.

Геолого-математическое моделирование кимберлитового месторождения трубка «Нюрбинская» проводилось путём интерполяции по методу кригинга для каждого геологического блока в отдельности. Единственной особенностью при создании модели было выделение верхнего 15-метрового слоя в отдельный блок, что связано с высокими значениями общего содержания и большой дисперсией. Данные расчетов очень хорошо согласуются с представленными отчетными материалами, как по расчету общего содержания, так и по подсчетом объемов руды.

Построение геолого-математической модели месторождения и оценка общего содержания алмазов по геологическим блокам производился с помощью пакета программ Datamine. Расчеты производились с использованием геостатистических методов, позволяющих описать пространственную взаимосвязь данных исследуемого признака и приложить этот анализ в прогнозе пространственных значений. Дополнительно к

пространственному расчету и интерполяции данных, важные компоненты анализа геостатистики включают анализ ошибки и интеграцию второстепенных данных в алгоритмах прогноза с помощью кригинга. Геостатистика позволяет оценить выполнение расчетов, а также обнаружить ошибки в исходных данных, использующих анализ, который включает распределение ошибки оценки с применением перекрестной проверки. Таким образом, кригинг позволяет выполнять оптимальную оценку при расчетах одной переменной. Обычно методы интерполяции применяют считая, что расчетные данные не имеют ошибки, что является часто достаточно неверным предположением. Практически ошибка не устраняется, а только минимизируется, что и используется при интерполяции по методу кригинга.

Точность пространственной экстра- и интерполяции в общем случае зависит от следующих факторов:

- количество точек опробования и качество исходных данных;
- пространственная выдержанность исследуемой переменной;
- характер распределения точек опробования – равномерно распределенные точки прямых измерений обеспечивают более высокую достоверность оценок;
- расстояние между точками опробования и точками или блоками, для которых производится расчет; наиболее достоверные значения определяются в том случае, если во внимание берутся вначале значения соседних точек, а влияние удаленных точек прямо пропорционально их расстоянию.

Таким образом, кригинг можно изначально определить как метод, учитывающий вышеуказанные факторы, а оценки расчетных значений имеют близкую к нулевой ошибку и минимальную дисперсию.

Решая задачу оптимального метода расчета наиболее достоверной модели, проводился анализ моделей рудного тела с использованием различных методов моделирования. По полученным результатам проводился сравнительный анализ с исходной информацией, а также использовался метод перекрестной проверки, выполняющий трехмерный точечный кригинг-анализ. В результате проведенных исследований по выбору метода моделирования, применимых непосредственно к кимберлитовым месторождениям, было отдано предпочтение методу кригинга. По сравнению с другими оценочными методами, кригинг дает несмещенную оценку среднего содержания по всему объему рудного тела, а также, что немаловажно, минимизирует дисперсию оценки. Общая схема работы системы по расчету качественных значений методом кригинга следующая:

- выбор каждого оцениваемого блока;
- поиск ближайших проб, влияющих на оценку расчетного блока;
- нахождение вариограмм и расчет величины ковариации между содержаниями в пробах;
- решение системы линейных уравнений кригинга и определение весовых коэффициентов с учетом минимизации дисперсии;
- расчет среднего содержания в блоке и определение возможной величины ошибки произведенных расчетов.

При верно выбранном методе моделирования, с учетом геостатистических особенностей оцениваемого объекта, возможно получение максимально приближенного к истинному распределению изучаемого признака в объеме рудного тела.

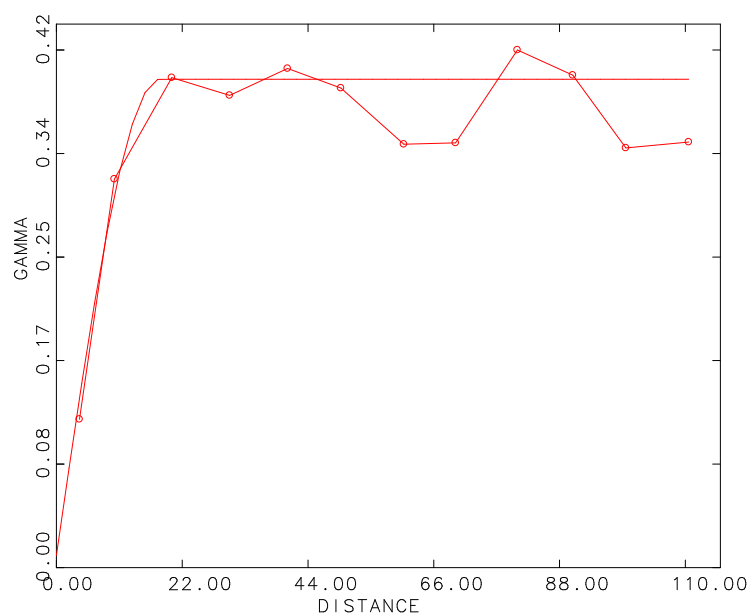


Рис. 5.5. Вариограмма и теоретическая модель для расчетов общего содержания алмазов

Необходимо отметить, что для расчетов геолого-математической модели месторождения были применены несколько вариограмм, соответственно для каждого геологического блока использовались свои параметры. Проверка расчетов проводилась с использованием метода cross-validation (перекрестная проверка). При этом сравнивались исходные данные с полученными расчетными результатами, оценивалась дисперсия проведенных расчетов.

Общая геолого-математическая модель месторождения включает в себя вмещающие породы и рудное тело с данными физико-механических свойств и содержания алмазов, имеющих среднее значения для каждого геологического блока. Вмещающие породы и геологические блоки имеют кодировку, необходимую для дальнейших расчетов по оптимизации карьера и планирования отработки месторождения.

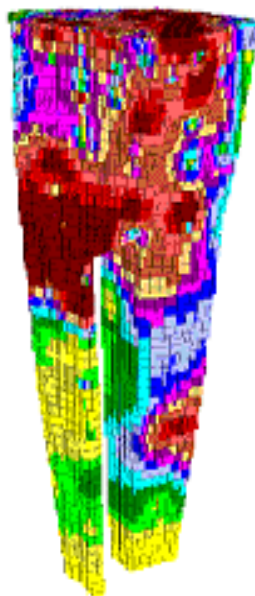


Рис. 5.6. Модель трубки Нюрбинская по общему содержанию алмазов.

5.2 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «ЮБИЛЕЙНАЯ»

Кимберлитовая трубка "Юбилейная" находится на юго-западной окраине Анабарской антеклизы в зоне сочленения с Тунгусской синеклизой. Кимберлитовая трубка "Юбилейная" имеет площадь поверхности 55,95 га и является крупнейшей в Якутской алмазоносной провинции. Месторождение, помимо собственно трубки "Юбилейной", включает в себя близрасположенное кимберлитовое тело "Отторженец".

Трубка "Юбилейная" залегает в толще нижнепалеозойских карбонатных пород и перекрывается верхнепалеозойскими терригенными образованиями, интродуцированными и бронированными траппами. Внедрение кимберлитов произошло в два этапа, что определило особенности их вещественного состава и алмазоносности.

Кимберлитовое тело "Отторженец" залегает в толще перекрывающих пород на северо-западном фланге месторождения. Оно входит в контур карьера и характеризуется промышленной алмазоносностью. Трубка "Озерная", расположенная в непосредственной близости от трубки "Юбилейной" (в 33-х м), в отличие от "Отторженца", обладает убогой алмазоносностью и не представляет промышленного интереса.

Кимберлитовмещающие породы

Трубка "Юбилейная" прорывает нижнепалеозойские отложения, представленные карбонатными и терригенно-карбонатными породами кембрия, ордовика и силура. Терригенно-карбонатная толща сложена преимущественно доломитами и известняками, в меньшей степени - известковистыми песчаниками, аргиллитами, алевролитами, мергелями, известковистыми конгломератами. Для пород верхнего кембрия и ордовика характерны: пористость, каверзность, развитие битума и гипса. Залегание кимберлитовмещающих пород близко к горизонтальному. Контакты с кимберлитами, как

правило, резкие, четкие. В отдельных случаях в зоне эндоконтакта наблюдаются задиры (с углами 5-11°) и повышенная трещиноватость пород. Нередко развиты зоны интенсивного дробления вмещающих пород, вплоть до образования своеобразных карбонатных брекчий, иногда инъецированных кимберлитами. Брекчии сложены обломками карбонатных пород, сцементированными глинисто-карбонатным материалом; размеры обломков варьируют от нескольких миллиметров до 5-10 м в поперечнике.

В целом механическое воздействие кимберлитового тела на вмещающие породы прослеживается в приконтактной зоне шириной от 2-3 до 10-15 м, иногда достигающей 30-40 м.

Контактные изменения во вмещающих породах проявились слабо и выражены в незначительной закалке, серпентинизации и пропитывании гидроокислами железа экзоконтакта (не более 1,0 м); по трещинам развиты кальцит, редко - пирит и арагонит.

На отдельных участках во вмещающих породах наблюдаются жилы кимберлитов мощностью от нескольких сантиметров до 2 м. Наиболее крупные из них ("Первомайская" - мощностью до 2 м и "Новогодняя" - мощностью 0,4 м) установлены в зоне тектонических нарушений северо-восточного простирания, к которой приурочены трубки "Юбилейная" и "Озерная".

Перекрывающие породы

Трубка "Юбилейная" полностью перекрыта терригенными образованиями каменноугольно-пермского возраста и туфогенными породами верхней перми - нижнего триаса, тиражированными маломощными полого-секущими телами долеритов.

Каменноугольно-пермские терригенные отложения представлены разнообразно переслаивающимися углистыми и песчанистыми алевролитами, кварц-полевошпатовыми и полимиктовыми песчаниками с линзами и прослоями бурых углей (мощностью до 3,5 м) и мелко-галечных конгломератов. Залегание их в целом субгоризонтальное. В зонах внедрения пластовых интрузий долеритов они интенсивно смяты и раздроблены, а отдельные блоки смещены в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Пермо-триасовые туфогенные образования (туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты) залегают в верхних частях разреза терригенной толщи.

Терригенные и туфогенные породы интродуцированы маломощным (от 1-3 до 35 м) полого-секущим силлом долеритов, который в восточной части месторождения залегает непосредственно на поверхности кимберлитового тела, а в западной - выходит на дневную поверхность, прорывая терригенную толщу. В процессе внедрения трапповый силл "срезал" и переместил на значительные расстояния (сотни метров) отдельные блоки вмещающих пород и кимберлитов. Именно таким образом образовалось бескорневое тело "Отторженец", перемещенное трапповой интрузией к современной поверхности на многие сотни метров от материнского тела трубки "Юбилейной".

Общая мощность перекрывающих трубку пород колеблется от 42 м на северо-восточном фланге месторождения до 94 м на юго-западном, составляя в среднем 66 м.

Морфология рудных тел

Кимберлитовая трубка "Юбилейная" имеет в плане удлиненную грушевидную форму. Простирание трубки по длинной оси северо-восточное по азимуту 72°.

Трубка "Юбилейная" является крупнейшей в Якутской алмазоносной провинции. Размер рудного тела под перекрывающими породами составляет 1293x741 м, площадь

поверхности равна 56га. С глубиной трубка существенно сужается. При этом, в восточной части сужение ее с глубиной происходит более умеренно, чем в центральной и западной частях. Поверхность рудного тела неровная. Относительное превышение составляет 44-48м.

До глубины 230м от поверхности рудного тела (до гор. +320м абс.) трубка "Юбилейная" имеет чашеобразную форму с пологопадающими контактами к центру диатремы (под углами 30-60°). Глубже 230м, начиная с основания чашеобразного расширения (гор. +320м), контакты трубки приобретают более крутое (70-85°) залегание, придавая рудному телу штокообразную форму.

В восточной (суженой) части трубки раструб наблюдается лишь в приповерхностной части рудного тела до глубины 130м (+420м абс.) с падением контактов к центру тела под углами 50-70°, а глубже углы падения возрастают до 75-85°.

С глубины 430м от поверхности рудного тела (ниже гор. +120м абс.) трубка превращается в дайкообразное тело с субвертикальным залеганием и крутопадающими (85-90°) контактами.

Кимберлитовое тело "Отторженец" имеет пластообразную форму и является бескорневым. Размер его в плане составляет 440х310м. Его мощность изменяется от 1,7м до 19,7м и составляет в среднем 9,9м. Юго-западный фланг этого тела площадью 100х25м выходит на дневную поверхность. Мощность перекрывающих тело "Отторженец" пород равна в среднем 24,3м.

Условия формирования и внутреннее строение месторождения

Судя по датированным ксенолитам и возрасту перекрывающих отложений, формирование трубки произошло в позднедевонскую-раннекаменноугольную эпоху. Трубка "Юбилейная" имеет сложное внутреннее строение, обусловленное двумя основными фазами внедрения кимберлитов.

На раннем этапе кимберлитобразования сформировалось дайкообразное тело массивных порфировых кимберлитов, вытянутое в северо-восточном направлении вдоль оси рудовмещающего разлома.

На втором этапе внедрения произошло формирование собственно трубки взрыва: воронкообразного тела, сложенного автолитовой кимберлитовой брекчией, с чашеобразным расширением у поверхности.

Кратерная (чашеобразная) часть диатремы сложена своеобразными породами кратерной фации: кимберлитовыми туфобрекчиями, ксенотуфобрекчиями на кимберлитовом цементе и крупными ксенолитами вмещающих пород. Последние образуют в основании "чаши" так называемый ксенолитовый пояс. Крупные ксенолиты являются неалмазоносными, а ксенотуфобрекчии характеризуются весьма убогой алмазоносностью, что и предопределяет необходимость селективной отработки кимберлитовых пород кратерной фации (блоки 2В, 6В).

После окончательной консолидации трубки, она длительное время, вплоть до среднекаменноугольной эпохи, находилась в условиях денудации, когда была существенно размыта верхняя часть диатремы. В каменноугольно-пермское время трубка была полностью погребена под терригенными образованиями указанного возраста и больше не размывалась.

Месторождение трубка "Юбилейная" представлена тремя рудными столбами - центральным, западным и восточным, сложенными несколькими разновидностями

кимберлитов, различающимися по текстурно-структурным особенностям, вещественному составу и степени алмазоносности (Рис. 5.7).

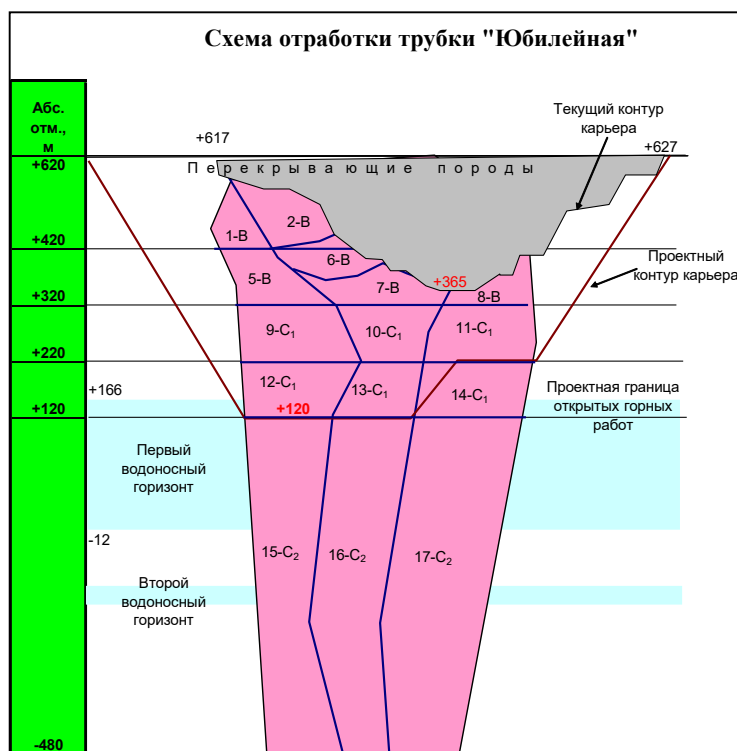


Рис. 5.7. Схема отработки запасов трубки «Юбилейная»

Бескорневое кимберлитовое тело "Отторженец", расположенное на северо-западном фланге трубки "Юбилейной", представляет собой отторгнутый траппами блок этой диатремы, что доподлинно установлено в процессе изучения их вещественного состава. Размеры перемещенного блока составляют 440x310м, а его состав и алмазоносность полностью отвечают кимберлитам северо-восточного фланга месторождения.

Вещественный состав кимберлитов

Трубка "Юбилейная" сложена двумя основными типами кимберлитовых пород - порфировыми кимберлитами и автолитовыми кимберлитовыми брекчиями, соответствующими двум фазам формирования рудного тела. Кроме того, в верхней кратерной части центрального рудного столба отмечаются кимберлитовые туфобрекчии (блок 2В), подстилаемые своеобразными кимберлитовыми породами зоны смешения (блок 3В). Последние образовались на границе двух типов руд (АКБ и туфобрекчий) и, по сути, являются промежуточной (переходной) их разновидностью.

Порфировые кимберлиты, слагающие западный и восточный рудные столбы, имеют серую и зеленовато-серую до темно-зеленой окраску. Они характеризуются на всю изученную глубину исключительным постоянством состава и текстурно-структурных особенностей. Текстура пород массивная, структура - порфировая. Порфировые выделения представлены псевдоморфозами серпентина, реже кальцита по оливину. Ксеногенный материал (главным образом обломки карбонатных пород) присутствует

здесь в незначительном количестве (5-7%) и лишь в зонах экзоконтакта отмечается увеличение его содержаний (до 20-25%).

Автолитовые кимберлитовые брекчии, слагающие центральный рудный столб, имеют зеленовато-серый с синим оттенком цвет и, также как порфировые кимберлиты, характеризуются постоянством состава и текстурно-структурных особенностей на всю изученную глубину. Текстура пород брекчиевая с автолитовой текстурой связующей массы, структура - кристаллолитокластическая. С глубиной в автолитовых брекчиях наблюдается количественное перераспределение ксеногенного материала в сторону значительного увеличения ксенолитов кристаллических пород и резкого уменьшения обломочного материала карбонатных пород. Алмазоносность автолитовых кимберлитовых брекчий в разведанной части месторождения в среднем в два раза выше, чем в порфировых кимберлитах.

Таким образом, выделенные по геологическим данным рудные столбы, сложенные порфировыми кимберлитами и автолитовой кимберлитовой брекчией, отчетливо различаются между собой как по петрографическим и минералогическим особенностям, так и по степени алмазоносности на всю разведанную глубину.

Кимберлитовые породы зоны смешения, сменяющие вверх по разрезу автолитовые кимберлитовые брекчии и перекрытые кимберлитовыми туфобрекчиями, слагают основание кратерной части диатремы и представляют собой толщу местами полосчатых кимберлитовых пород. Они имеют серую, желтовато- и зеленовато-серую пятнистую окраску и характеризуются пестрым петрографическим составом, что обусловлено особенностями их формирования. В их составе присутствуют включения порфировых кимберлитов первой фазы внедрения, обломки и крупные блоки вмещающих пород и линзы кимберлитовых туфобрекчий, которые сцементированы автолитовой кимберлитовой брекчией, аналогичной вышеописанной. Текстура их полосчатая, сланцевая, брекчиевая: структура – милонитовая, порфировая, литокристаллокластическая. Алмазоносность пород зоны смешения является промежуточной между алмазоносностью автолитовой кимберлитовой брекчии и туфобрекчией.

Кимберлитовые туфобрекчии, слагающие верхнюю часть диатремы имеют мощность от первых метров до 100-130м. Они отличаются светло-серой, серой и зеленовато-серой окраской. Текстура их брекчиевая, структура милонитовая, катакластическая и лиюкластическая. На серпентин-карбонатную связующую массу приходится в среднем 52.24% от общего объема породы. Содержание алмазов в них достаточно низкое и зависит от содержания ксеногенного материала.

Среди кимберлитов кратерной фации выделяются своеобразные разновидности пород с крайне убогой алмазоносностью. К ним относятся ксенотуфобрекчии, крупные ксенолиты вмещающих пород и такситовые кимберлиты.

Ксенотуфобрекчии встречаются в туфобрекчиях в виде скоплений ксеногенного материала, сцементированного кимберлитовым цементом. Содержание в них ксенолитов вмещающих пород нередко достигает 60-80%, в результате чего алмазоносность этих пород бывает крайне низкой (0,1-0,3кар/т).

Крупные ксенолиты вмещающих пород, как правило, распределены в кимберлитовой матрице крайне неравномерно и лишь в основании кратера они образуют единую зону, называемую "ксенолитовым поясом". Указанные ксенолиты имеют размеры от нескольких метров до нескольких десятков метров. Состав их преимущественно

карбонатный и терригенно-карбонатный, что соответствует составу вмещающих трубку нижнепалеозойских пород.

Такситовые кимберлиты встречаются в образованиях кратерной фации в виде линз и маломощных невыдержанных горизонтов. Они представлены полосчатыми и пятнисто-линзовидными разновидностями кимберлитов с повышенным содержанием мелкообломочного ксеногенного материала. По видимому, такие породы образовались в процессе обрушения крупных ксенолитов и плит кровли в кратер трубки, что способствовало вытеснению и растеканию еще не застывшего кимберлитового расплава с попутным обогащением его перетертым и рассланцованным ксеногенным материалом.

Вышеуказанные породы (крупные ксенолиты, ксенотуфобрекчии и такситовые кимберлиты) характеризуются крайне убогой алмазонасностью и относятся к некондиционным рудам. Эти породы хорошо картируются в бортах и днище карьера, что позволяет вести селективную отработку запасов кратерной фации.

Кимберлитовое тело "Отторженец" сложено сильно выветрелой кимберлитовой брекчией и туфобрекчией с признаками термального воздействия траппов. Окраска пород разнообразная, с преобладанием серого и зеленого оттенков. Текстура - брекчиевая. структура – кристаллолитокластическая, местами порфировая. Содержание ксенолитов карбонатных пород достигает в ней 20% и выше.

Построение геолого-математической модели месторождения.

При планировании горно-геологических работ и проектировании карьеров возникает вопрос о геологическом строении как кимберлитового тела, так и околотрубного пространства. Знание геологического строения важно тем, что породы, слагающие околотрубное пространство имеют различные физико-механические свойства (крепость, плотность, измельчаемость и т.д.), что необходимо учитывать при проектировании карьеров.

Блочная геологическая модель кимберлитового месторождения трубка «Юбилейная». создавалась на основе вертикальных разрезов по линиям, представленных в геологическом отчете, а также с учетом эксплуатационных скважин и скважин глубокой разведки. Для создания блочной модели была разработана методика, включающая ввод данных, интерпретацию, моделирование и последующую редакцию созданной модели.

Разработанная методика моделирования блочной геологической модели с использованием пакета программ Datamine состоит из следующих этапов:

1. Ввод с дигитайзера геологических разрезов по разведочным линиям .
2. Перевод плоскости разреза геологических линий в истинные координаты.
3. Создание файлов периметров по каждой геологической линии и объединение их в единый файл.
4. Редакция файла периметров с учетом геологоразведочных скважин.
5. Создание каркасных моделей по каждому геологическому типу пород, с присвоением каждому типу своего кода (формализация).
6. Построение блочных моделей по каждой отдельно взятой каркасной модели и объединение всех в единую блочную модель.
7. Уточнение блочной модели с учетом всех геологических данных.
8. Редакция блочной модели с использованием специального редактора, изменение и уточнение данных.

Создание каркасных моделей и редактирование файлов периметров проводилось при помощи графического приложения “Guide”, дающего возможность работать в трехмерном пространстве, что просто необходимо при производстве подобных работ.

Также очень важно учитывать насколько точная геологическая модель требуется для производства последующих работ. Возможно построение геологической блочной модели с отображением очень мелких деталей и с достаточно подробной отрисовкой контактов геологических пород и т.п. Однако при этом необходимо учитывать, что размеры геологической модели возрастают и, соответственно, увеличивается время на создание подобных моделей. То есть точность построения геологических моделей должна соответствовать поставленным задачам.

Одной из особенностей геологического строения тр.Юбилейная заключается в том, что верхняя часть разреза имеет достаточно сложное строение в результате внедрения траппов и сложной конфигурации пермских отложений. Нижняя часть модели является простой в плане построения блочной модели и представлена практически горизонтальным согласным залеганием силурских, ордовикских и кембрийских отложений.

Таким образом созданная геологическая модель по тр.Юбилейная может быть использована для построения геологических разрезов в любом направлении, заданном пользователем, а также для получения планов и карт на любом горизонте, интересующего геологов.

Кроме того, такая модель может быть задана в виде прототипа при расчете геолого-математической модели, что даст более полное представление не только о распределении алмазов или любого физического параметра, но и соответствие последних различным типам пород.

Учитывая различные физико-механические свойства геологических пород (особенно в верхней части разреза), возможно более надежное проектирование карьера.

При поступлении новых геологических данных, блочная геологическая модель, в отличие от каркасных, достаточно легко редактируется и любое изменение можно произвести в трех направлениях, т.е. пространственное уточнение модели не представляет особенного труда. И что не менее важно, подобная модель дает визуально более полное представление о геологическом строении как кимберлитового тела, так и околотрубочного пространства.

Кроме того, учитывая наличие таликовых зон (оз.Травянистое, оз.Бузымянное) в пределах контура карьера, были построены каркасные модели таликов. Эти каркасные модели созданы по материалам гидрогеологов и могут быть при необходимости добавлены в виде блочной модели к основной геологической модели.

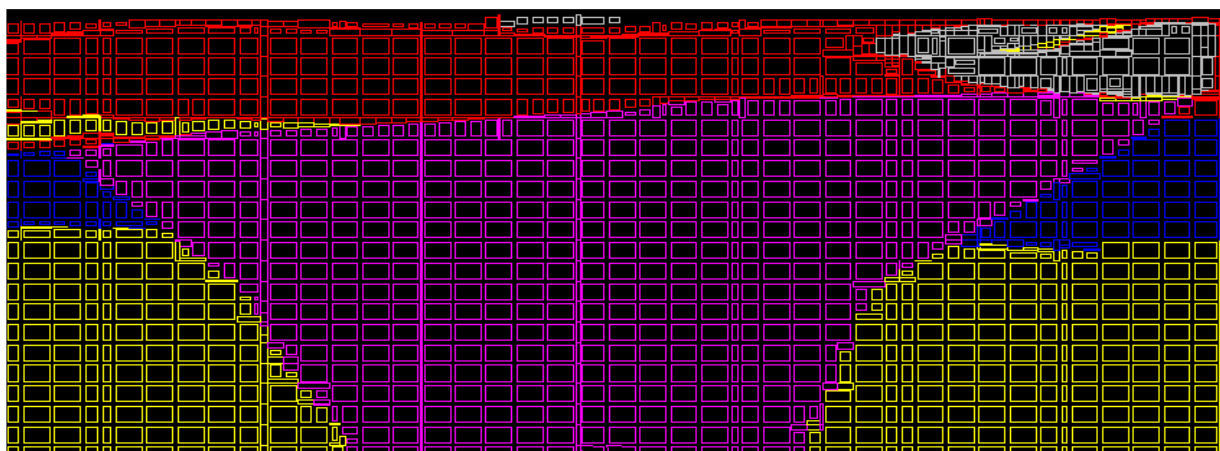


Рис. 5.8. Блочная модель трубки «Юбилейная»



Рис. 5.9. Каркасная модель трубки «Юбилейная»

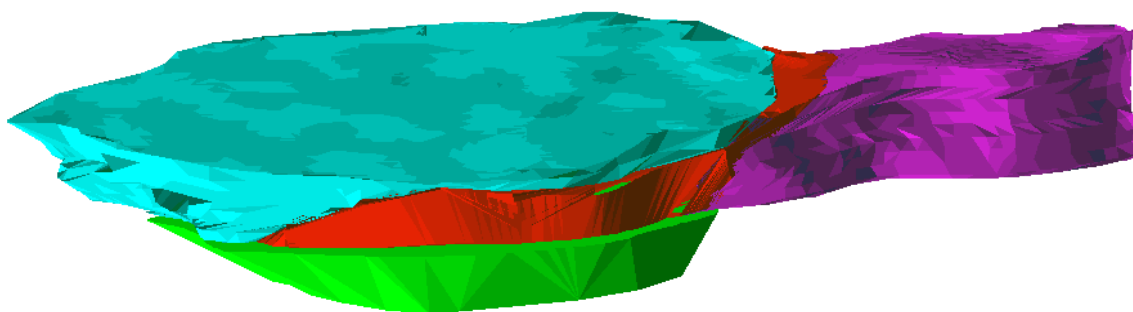


Рис. 5.10. Геологическая блокировка верхней части разреза рудного тела

Расчеты распределения общего содержания алмазов проводились для каждого выделенного геологического блока отдельно, с использованием всей имеющейся информации и данных опробования методом кригинг. Одним из этапов статистического анализа является расчет экспериментальных вариограмм, позволяющий выявлять структурные неоднородности (изменчивость) пространственного размещения исследуемого компонента внутри геологического объекта. Такой расчет проводился после композирования проб с интервалом отвечающему величине обрабатываемого горизонта, в данном случае 15-метровыми отрезками.

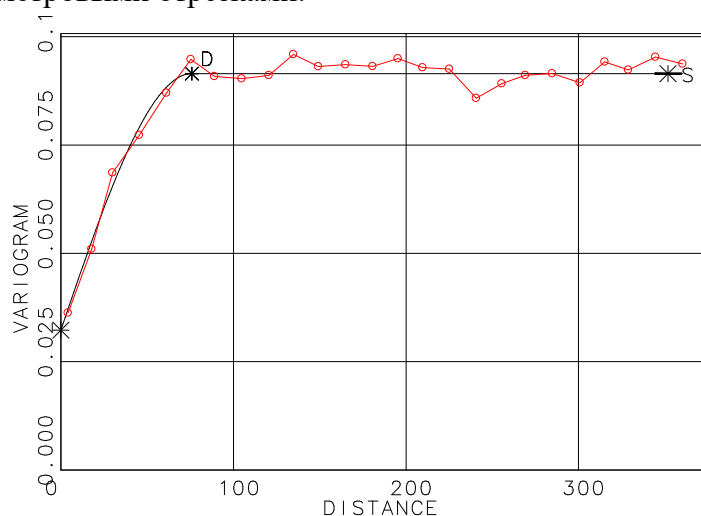


Рис. 5.11. Вариограмма общего содержания алмазов для геологического блока 2-В по данным опробования разведочных скважин

Результатом расчетов является блочная модель по общему содержанию алмазов в рудном теле месторождения трубка «Юбилейная».

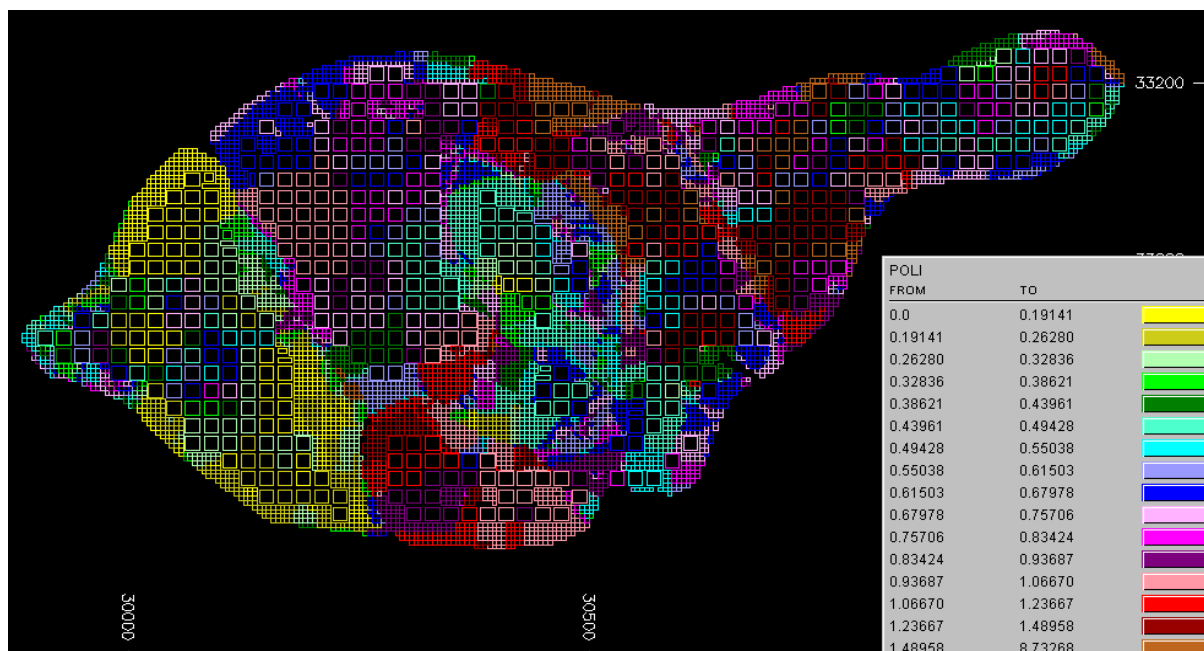


Рис. 5.12. Горизонтальное сечение блочной модели трубки «Юбилейная»

Важной стадией при интерпретации геологической информации в области районирования, является выделение ксенолитов в пределах оцениваемых блоков. Выделенные ксенолиты (представленные в основном карбонатным составом) имеют различные размеры (от 5 до 40м в поперечном сечении) и приурочены, в основном, к выделенным областям забалансовых руд. По результатам выделенных областей ксенолитов построена модель по 2 и 6 блоку с учетом особенностей распределения ксенолитовых пород в пространстве рудного тела. Пример выделенных областей представлен на Рис. 5.13.

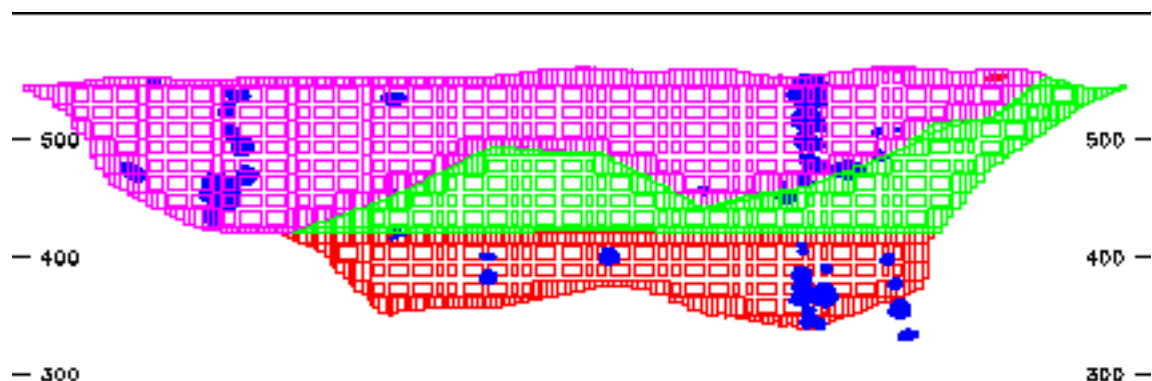


Рис. 5.13. Выделенные ксенолиты по данным геологических разрезов для 2 и 6-го геологических блоков трубки «Юбилейная». (продольный разрез):

- 2 геологический блок;
 - 3 геологический блок
 - 6 геологический блок;
 ● - выделенные ксенолиты

Кроме выделения ксенолитов в рудном теле тр.Юбилейная, была построена модель распределения содержаний алмазов для выделения забалансовых руд по 2-му геологическому блоку. Забалансовые руды определены в соответствии с данными опробования и результатами геологического бурения скважин всех стадий разведки месторождения. Объем забалансовых руд составил 22% от всего объема руды 2-го блока.



Рис. 5.14. Модель 2-го геологического блока с выделенными областями забалансовых руд.

- балансовые руды
 - забалансовые руды.

Как видно из представленных рисунков, результаты расчетов и геологических данных достаточно хорошо согласуются между собой. Таким образом, модель месторождения с расчетными значениями содержаний алмазов для забалансовых руд может быть использована при районировании. В качестве критерия выделения участков ксенолитизированных пород, кроме исходной геологической информации, может быть использованы расчетные значения модели месторождения.

При формировании модели физико-механических свойств тр.Юбилейной использовались данные геологоразведочных скважин и результаты испытаний, представленных Айхальским ГОКом.

Результатом обобщенной модели является:

- геологическое строение рудного тела и вмещающих пород
- выделение ксенолитов во 2 и 6 геологическом блоке
- построение модели по плотностным характеристикам кимберлитов и вмещающих пород
- выделение геологических блоков
- построение модели (северо-восточного фланга кимберлитового тела) по объемному весу, крепости и распределению тяжелой фракции.

Ниже, на Рис. 5.15 представлены модели кимберлитового тела по этим параметрам.

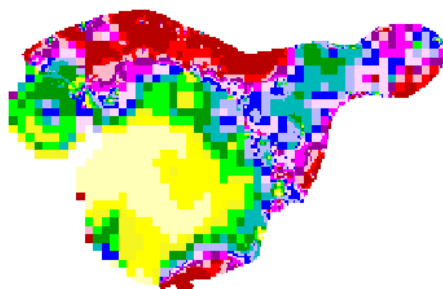


Рис. 5.15. Модель рудного тела трубки Юбилейной по объемному весу

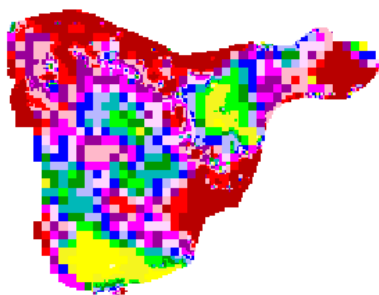


Рис. 5.16. Модель рудного тела трубки Юбилейной по крепости пород

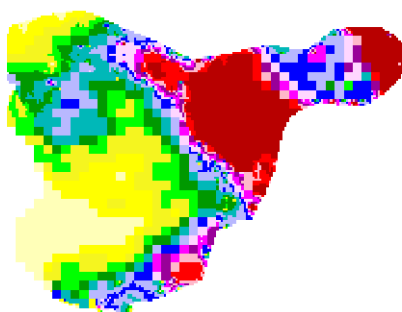


Рис. 5.17. Модель рудного тела трубки Юбилейной по распределению тяжелой фракции

Модели рассчитывались с применением программного обеспечения Datamine, методом интерполяции по данным опробования. Таким образом, обобщенная геологическая модель месторождения состоит из прямоугольных ячеек, каждая из которых несет информацию о пространственной привязке, принадлежности к типу пород, геологическому боку, данные по плотности, крепости, объемному весу и распределению тяжелой фракции (%). Кроме того, в модели выделены ксенолитизированные области кимберлитов (по данным геологического строения и распределению содержаний алмазов)

5.3 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «КОМСОМОЛЬСКАЯ»

Геологическое строение месторождения

Кимберлитовая трубка "Комсомольская" залегает на глубине 54-110 м (в среднем 65м) от поверхности. Минимальная мощность перекрывающих пород фиксируется под восточным флангом отторгнутого от трубки блока 1-В, и составляет в среднем 32 метра.

Кимберлитовая трубка "Комсомольская" имеет в плане дайкообразную удлиненную форму. Простирается трубка северо-восточное по азимуту 65°, размеры ее под перекрывающими породами составляют 864х225м, на юго-западном и северо-восточном флангах рудное тело сужается, соответственно, до 40-60м и 15–20м.

Трубка образована двумя основными типами кимберлита: порфировым кимберлитом, слагающим дайкообразное тело ранней фазы внедрения и автолитовой кимберлитовой брекчией, образующей трубчатое тело, секущее порфировые кимберлиты (Рис. 5.18).

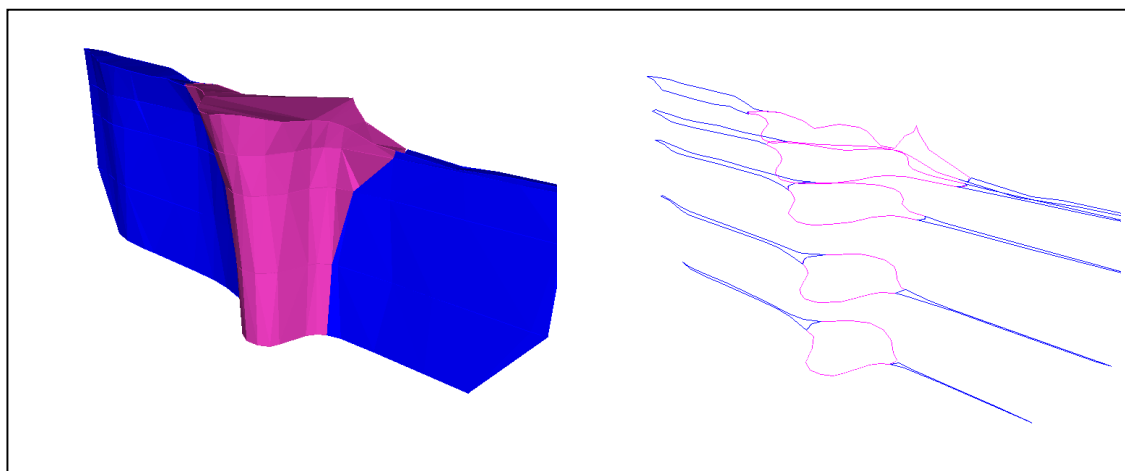


Рис. 5.18. Каркасная модель и контуры порфировых кимберлитов и автолитовой кимберлитовой брекчии, образующей трубчатое тело

Целостность кимберлитового тела нарушена секущей пластовой интрузией долеритов, отчленившей от основного рудного тела два крупных блока. Максимальные размеры кимберлитового блока, отторгнутого от северо-западного фланга трубки, в плане составляет 310x120м. Мощность его достигает 45-50м.

На северо-восточном фланге трубки верхняя часть кимберлитового тела срезана пластовой интрузией траппов и ориентировочно смещена на 40 м по азимуту 275°. Мощность смещенного блока 40- 45 м. Самая верхняя часть трубки имеет форму раструба с падением контактов рудного тела к центру под углом 50-70°. На глубине 50-100 м от поверхности рудного тела контакты приобретают субвертикальное залегание (под углом 80°-85°). Кимберлитовая трубка имеет в плане дайкообразную удлиненную форму.

Терригенные отложения, перекрывающие кимберлитовое тело, представлены преимущественно алевролитами, реже песчаниками. В основании этих отложений находится гравийно-галечный материал и продукты разрушения кимберлитов.

Мощность терригенных отложений колеблется в пределах от 0,15 м до 8,4 м, в среднем, составляя 2–2,5 м. Увеличение мощности терригенных отложений отмечается к северу от трубки. Основная часть разреза перекрывающих пород представлена разно кристаллическими долеритами.

На дневной поверхности трубки "Комсомольская" широкое развитие имеют отложения современного возраста, представленные суглинками, илами и торфами мощностью от 3 до 5 м. Кимберлитовая трубка "Комсомольская" в верхней части разреза прорывает комплекс нижнепалеозойских отложений, представленных горизонтально залегающими карбонатными и терригенно-карбонатными породами ордовика и нижнего силура. Наиболее древними из них являются доломитизированные известняки, песчаные известняки и глинистые доломиты олдондинской свиты нижнего ордовика (вскрытая мощность 40 м). Выше по разрезу залегают песчаные доломиты, оолитовые, водорослевые и песчаные известняки, глауконитовые доломиты сохсолохской свиты нижнесреднего ордовика. Мощность пород сохсолохской свиты в районе трубки составляет 80 – 85 м.

Залегающие выше отложения кылахской свиты средне-верхнего ордовика

представлены мергелями, мергелистыми известняками, глинистыми доломитами с характерной пестро цветной окраской пород. Мощность пород кылахской свиты колеблется от 25 до 40 м.

На размытой поверхности ордовика залегают скрыто зернистые, мелкозернистые известняки, глинистые и битуминозные известняки ландоверийского яруса нижнего силура мощностью от 10 до 30 м.

Вмещающие породы в зоне контакта с кимберлитовым телом характеризуются повышенной трещиноватостью, присутствием зеркал скольжения; нередко отмечается ожелезнение, кальцитизация и сульфидизация карбонатных пород, фиксируются небольшие зоны дробления и маломощные инъекции кимберлита. В отдельных случаях в приконтактных зонах отмечаются несколько повышенная трещиноватость вмещающих пород и кимберлитов, развитие зеркал скольжения и крупных трещин. Углы падения контактов кимберлитов с вмещающими породами варьируют от 62° до 75° - 82° .

Зона контакта отторгнутого блока кимберлитов с вмещающими породами вскрыта по наклонному стволу шахты в интервале 76,9-90,3 м. Известняки в пределах этой зоны интенсивно трещиноваты, разбиты на различные по величине блоки с нарушенным залеганием пород. Пространство между блоками нередко выполнено инъекциями кимберлитового материала. Породы трещиноватые, участками брекчированные с многочисленными зеркалами скольжения.

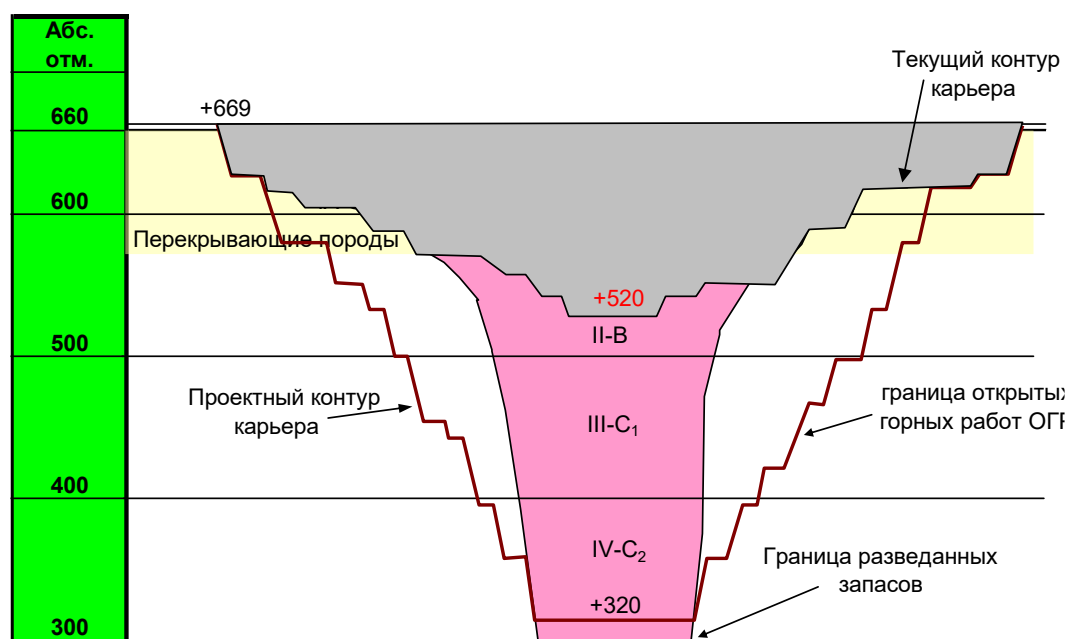


Рис. 5.19. Схема отработки запасов трубки «Комсомольская»

Геолого-математическое моделирование месторождения

База данных для создания геолого-математической модели месторождения тр. «Комсомольская» представляет собой следующий набор данных:

- -топографическая поверхность;
- -контуры рудного тела;
- -каркасные модели всего рудного тела и геологических блоков;

- геологические разрезы по линиям;
- -результаты кернового опробования;
- -координаты устьев скважин и данные инклинометрии;
- результаты валового опробования с координатной привязкой каждой пробы;
- -каркасная модель проектного контура карьера.

Геолого-математическая модель кимберлитового месторождения трубки «Комсомольская» создавалась с применением пакета программ Datamine по данным результатов кернового и валового опробования.

Одним из наиболее важных этапов построения геолого-математических моделей месторождения алмазов является этап геометризации рудного тела. Для более достоверного представления были построены поверхности рудного тела месторождения. Поверхности рудного тела отстраивались по данным геологических разрезов, планов и данных опробования. Подсчет объемов производился по созданным каркасным и блочным моделям для каждого геологического блока. На Рис. 5.20 представлена построенная каркасная модель месторождения тр. Комсомольская.

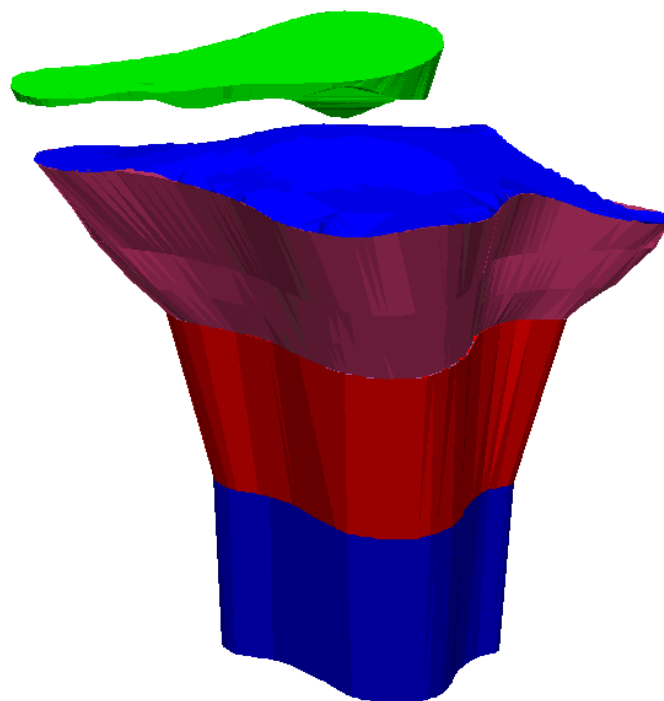


Рис. 5.20. Каркасная модель трубки «Комсомольская»

Для расчета общего содержания алмазов были использованы данные опробования кернового бурения. На Рис. 5.21 представлены гистограммы распределения содержаний алмазов по результатам опробования эксплоразведочных скважин.

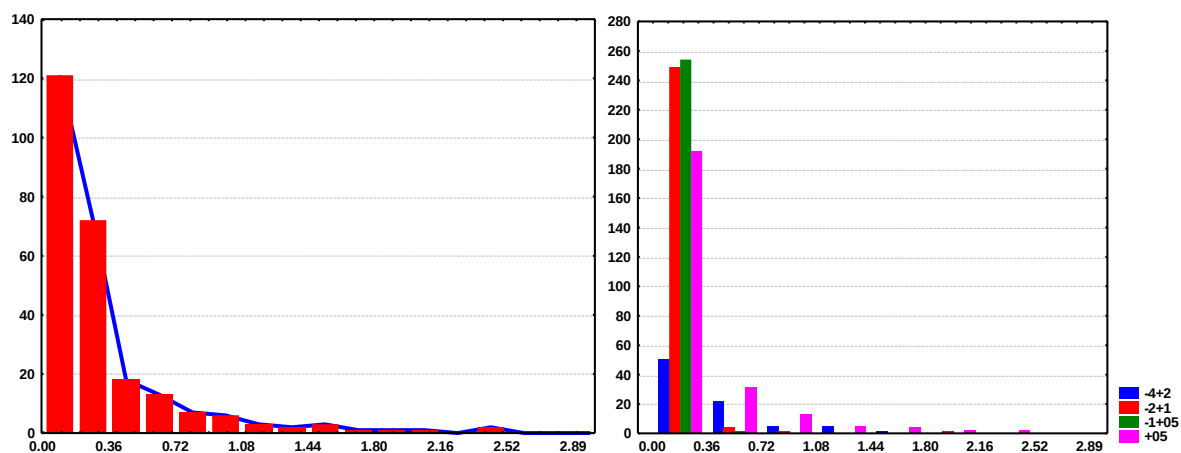


Рис. 5.21. Гистограммы распределения общего содержания алмазов (слева) и распределения содержания алмазов по классам (справа)

Модель месторождения трубки Комсомольская по содержанию алмазов создавалась с применением интерполяции по методу Кригинга. Пример расчетной вариограммы и подобранной модели показан на Рис. 5.22.

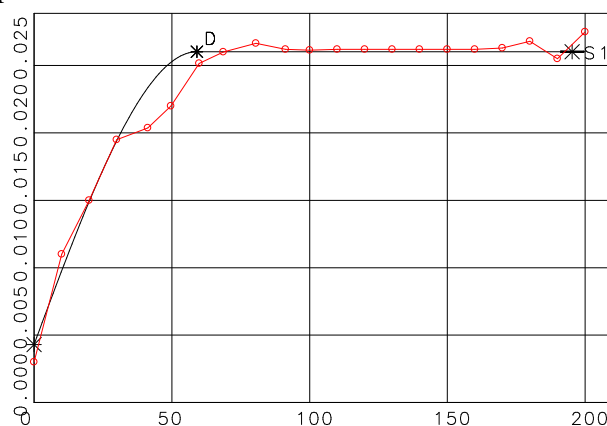


Рис. 5.22. Вариограмма для 2-го геологического блока месторождения тр. Комсомольская

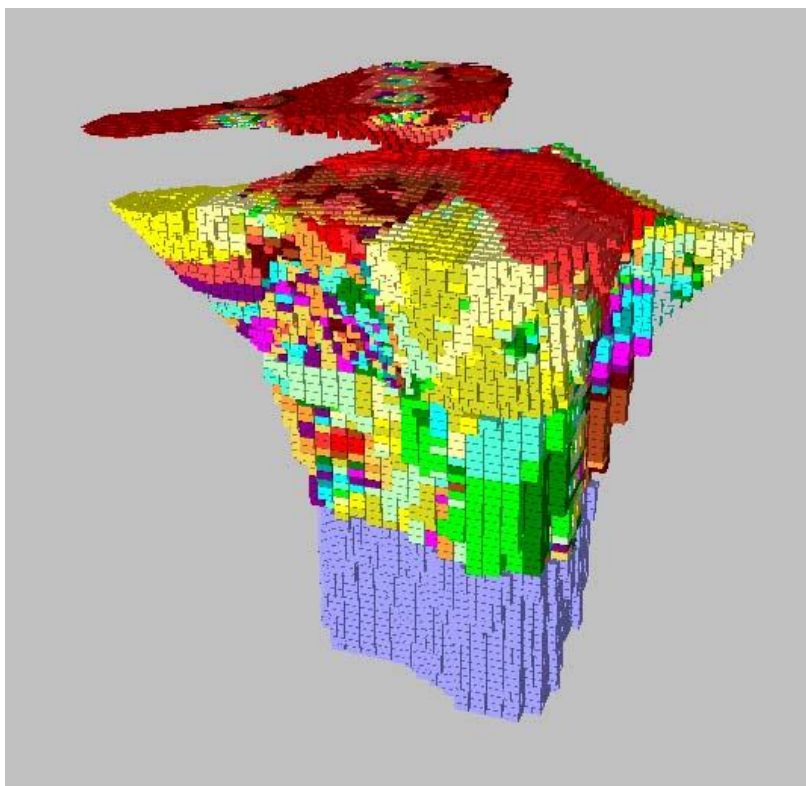


Рис. 5.23. Модель распределения общего содержания алмазов в рудном теле трубки Комсомольская

Общая геолого-математическая модель месторождения включает в себя вмещающие породы и рудное тело с данными физико-механических свойств и содержания алмазов, имеющих среднее значения для каждого геологического блока. Вмещающие породы и геологические блоки имеют кодировку, необходимую для дальнейших расчетов по оптимизации карьера и планирования отработки месторождения.

5.4 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «ЗАРНИЦА»

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Кимберлитовая трубка «Зарница» - первая трубка, открытая на территории Якутии Л.А.Попугаевой в 1954 году, - находится на площади Далдынского кимберлитового поля в северной части Далдыно-Алакитского алмазоносного района. Она располагается на левобережье верховья ручья Дьяха (левого притока р.Далдын). Трубка удалена на 14км восточнее г.Удачного и на 18км от обогатительной фабрики №12, на которой перерабатывается руда трубки «Удачная». Схема отработки запасов представлена на Рис. 5.24.

На дневной поверхности трубка «Зарница» характеризуется изометричной формой и имеет размер 520х540м. В разведанной части рудное тело отличается простой морфологией и представляет собой диатрему с каналом цилиндрического типа. Изменение площади поперечного сечения трубки с глубиной происходит постепенно, без резких пережимов с градиентом уменьшения площади до глубины 400м на каждые 100 метров в среднем 10,7-10,9%.

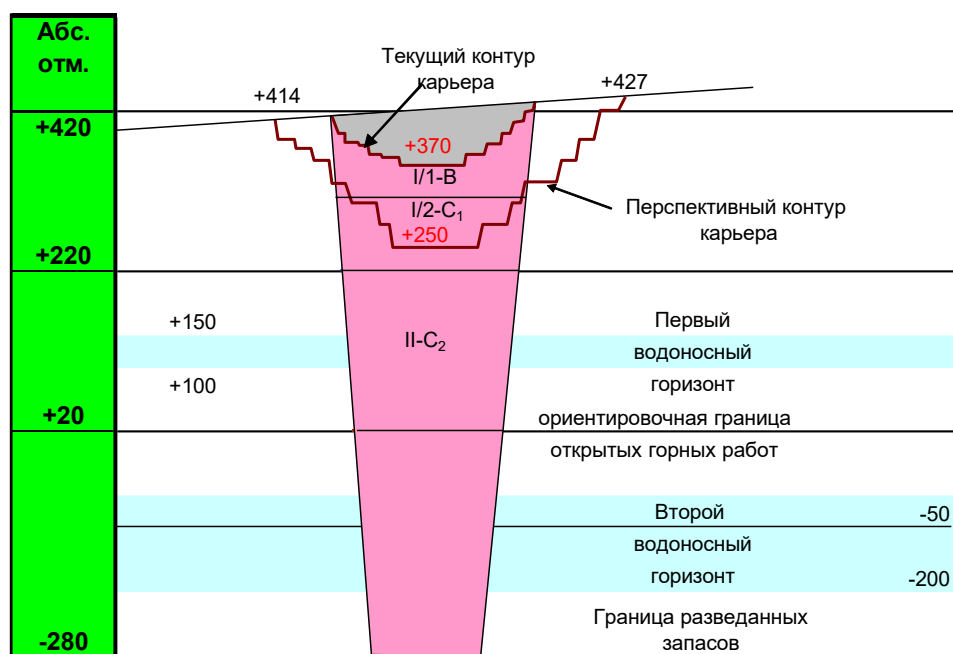


Рис. 5.24. Схема отработки месторождения трубки «Зарница»

На глубине 700м морфология рудного тела меняется от изометричной на овальную, несколько вытянутую в субмеридиональном направлении. Соотношение длинной и короткой осей трубки «Зарница» на всех подсеченных горизонтах близко к 1 и изменяется от 1,06 (гор.+220м) до 1,13 (гор.-280м).

Контакты рудного тела с кимберлитовмещающими породами имеют склонение к центру, углы падения контактов характеризуются крутизной от 90 до 70 градусов. Контур трубки в целом отвечает границе промышленного оруденения. В приконтактной зоне нередки инъекции кимберлитов во вмещающие породы в виде жилородных апофиз, сложенных породами, аналогичными кимберлитам основного трубчатого тела.

Вмещающие породы в разведанной части трубки представлены карбонатными отложениями нижнего ордовика (олдондинская свита) и верхнего кембрия (чукукская, мархинская и моркокинская свиты).

В трубке «Зарница» по текстурно-структурным особенностям и минеральному составу выделяются три разновидности кимберлитовых пород:

- автолитовая кимберлитовая брекчия (АКБ),
- кимберлитовая брекчия (КБ) и
- порфированный кимберлит (ПК).

В верхних горизонтах разведанной части трубки (от поверхности до глубины 400м) в блоках I-C1 (гор. от +422 до +220м, абс.) и II-C2 (гор. от +220 до +20м) преобладает АКБ. КБ характерна для глубоких горизонтов трубки, где она отмечается в низах блока II-C2 (10%) и в блоке III-C2 (95%). ПК слагает жильные тела по всему разрезу рудного тела в объеме 0,01%.

Трубка «Зарница» прорывает осадочные отложения верхнего кембрия, представленные переслаивающимися известняками, глинистыми известняками, доломитами и тонкими прослойками мергеля. У контакта с трубкой вмещающие породы

передроблены, в них отмечаются инъекции и прожилки кимберлита. Мощность контактно-измененных зон колеблется от 20-80см до 1,0м.

Описываемое месторождение характеризуется довольно равномерной толщиной элювиальных отложений, мощность которой колеблется от 2,0 до 3,0м. Элювиальные отложения представлены глыбами и щебнем кимберлита, сцементированными льдом, то есть продуктами коры выветривания руд.

Построение геолого-математической модели месторождения

Для создания базы данных по трубке «Зарница» использовались следующие информационные материалы:

- -топографическая поверхность;
- -контуры рудного тела;
- -каркасные модели всего рудного тела и геологических блоков;
- геологические разрезы по линиям;
- -результаты кернового опробования;
- -координаты устьев скважин и данные инклинометрии;
- результаты валового опробования с координатной привязкой каждой пробы;
- -каркасная модель проектного контура карьера.

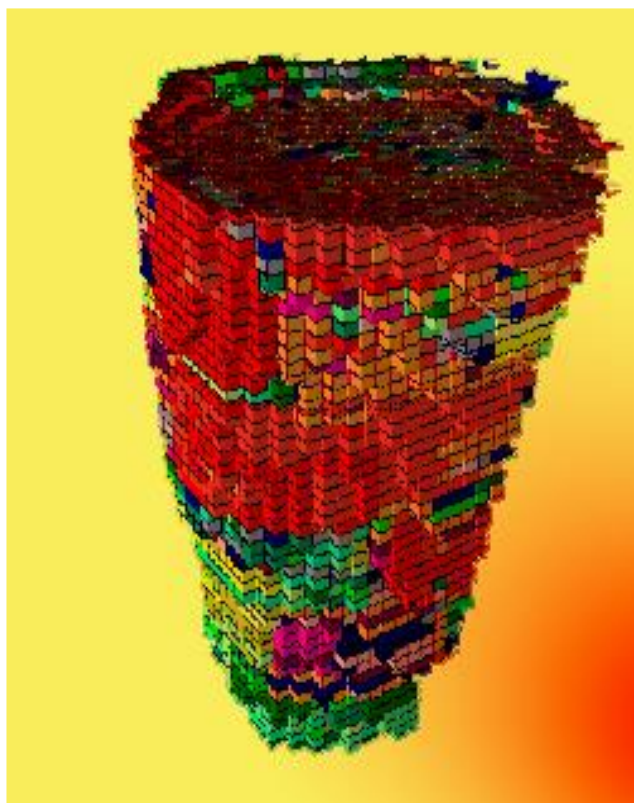


Рис. 5.25. Блочная модель трубки «Зарница»
по общему содержанию алмазов

На основании исходных данных были рассчитаны пространственные проложения буровых скважин, построены каркасные модели рудного тела и выделенных

геологических блоков, построена блочная модель и рассчитана геолого-математическая модель общего содержания алмазов. Исходя из результатов проведенных расчетов, проведенных на основе современных компьютерных технологий, а также с учетом эксплоразведки и отработки месторождения на данный период необходимо отметить неоднородную структуру распределения алмазов в пределах рудного тела, дающую возможность выделить несколько рудных столбов, имеющих более высокое значение относительно среднего распределения минерала.

Геостатистические исследования кимберлитовой тр. «Зарница» выявили следующие особенности распределения алмазов в рудном теле:

- высокий коэффициент корреляции общего содержания алмазов и гранулометрических классов +2.0 и +4.0 подтверждает данные о повышенном содержании кристаллов крупного класса в кимберлитовом теле;
- относительно высокий коэффициент корреляции между классами +1.0 и +2.0, что дает возможность определения коэффициента пересчета между этими гранулометрическими классами;
- наличие тренда нельзя интерпретировать достоверно, поскольку результаты опробования с нижних горизонтов не являются достаточно представительными;
- результаты анализа вариограмм по тр. Зарница дают возможность предполагать наличие нескольких петрографических разновидностей кимберлитов в рудном теле (Рис. 5.26);
- в результате анализа вариограмм выявлена анизотропия распределения общего содержания алмазов под углом около 60 градусов, что соответствует наличию столбчатых отдельностей кимберлитов в рудном теле трубки.

Поскольку данные опробования не давали представления о петрографических разновидностях кимберлитов и их геометрическом размещении в пространстве, а также отсутствовали данные о расположении столбчатых отдельностей кимберлитов, то построение вариограмм для последующего подбора к ним моделей и в результате – создание достоверной геолого-математической модели, накладывало определенные трудности и неопределенность в применении метода Кригинга. В расчете применялись результаты кернового опробования буровых скважин.

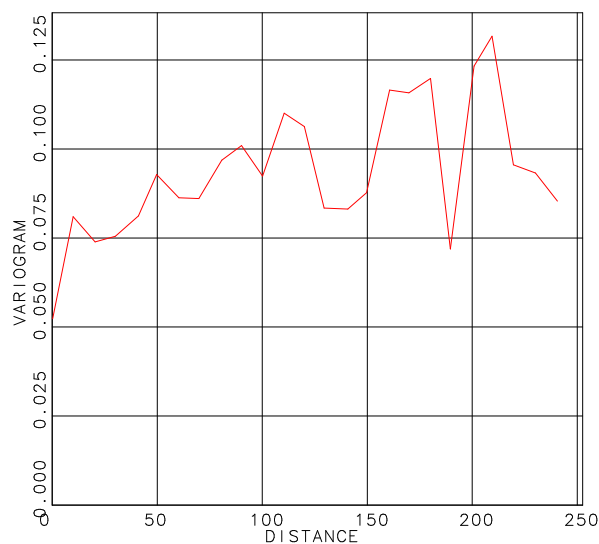


Рис. 5.26. Вариограмма результатов опробования данных детальной разведки трубки «Зарница»

На Рис. 5.27 представлены гистограммы данных опробования по общему содержанию алмазов для данных детальной разведки и стадии эксплоразведки месторождения. При анализе гистограмм, заметно снижение доли относительно высоких значений содержания при эксплоразведке по отношению к данным детальной разведки.

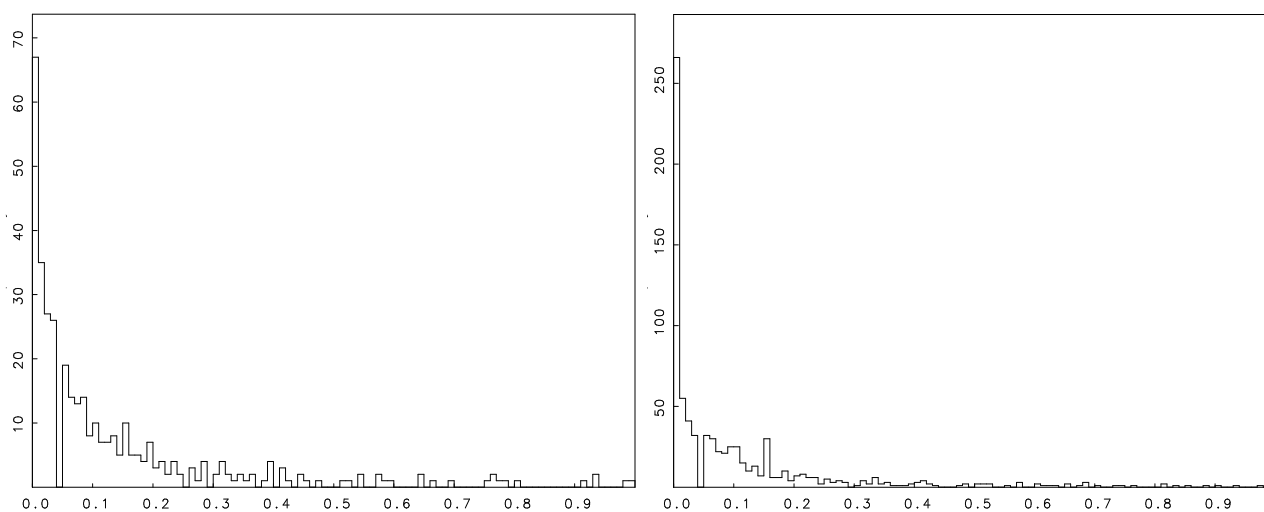


Рис. 5.27. Гистограммы по общему содержанию алмазов для детальной разведки (слева) и стадии эксплуатационной разведки (справа)

При расчете геолого-математической модели были использованы данные детальной разведки и эксплоразведки месторождения. На Рис. 5.28 представлены вариограммы и подобранные к ним модели для 1-го геологического блока. Как видно на данном рисунке при эксплоразведочной стадии заметно сгладилась экспериментальная вариограмма, не так четко выделены отдельные включения.

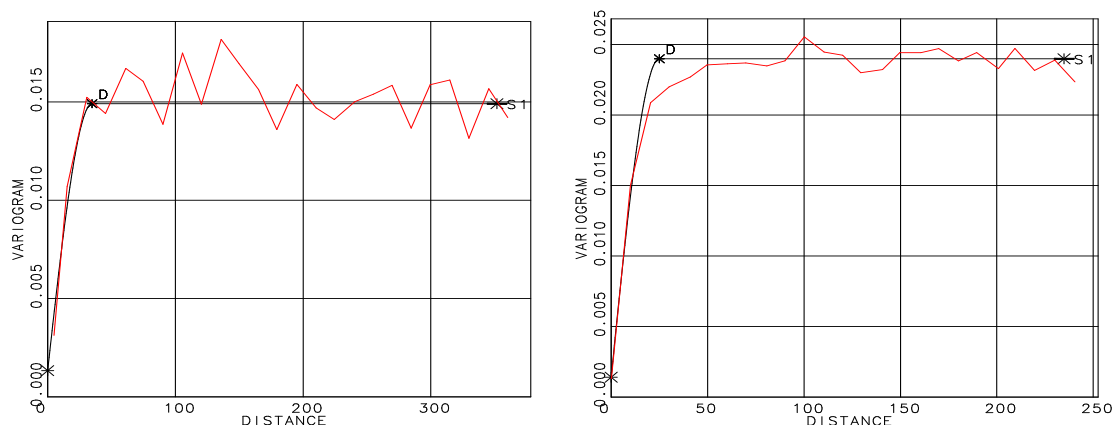


Рис. 5.28. Вариограммы для 1-го геологического блока трубки «Зарница» по данным детальной (слева) и эксплоразведочной стадии (справа)

Распределение содержаний алмазов в пределах рудного тела рассчитывались с применением метода кригинг (Рис. 5.29). Горизонтальное сечение блочной модели по результатам опробования детальной и эксплоразведочной стадии показано на Рис. 5.29.

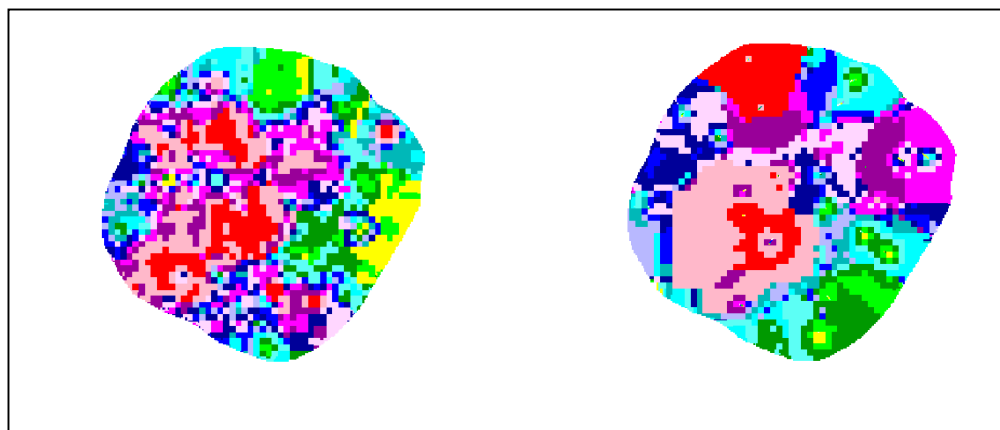


Рис. 5.29. Горизонтальные сечения блочной модели по общему содержанию алмазов месторождения тр.Зарница по данным эксплоразведки (слева) и детальной разведки (справа). Различным цветом выделено содержание алмазов по классу +0.5 мм

Результаты моделирования очень хорошо согласуются с утвержденными запасами, то есть объем горной массы и среднее содержание соответствуют данным опробования и геологической разведки.

5.5 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «УДАЧНАЯ»

Месторождение трубка «Удачная» представляет собой сдвоенную диатрему, сложенную двумя субвертикальными кимберлитовыми телами. Расчленение на два самостоятельных рудных тела — Восточное и Западное — происходит на глубине 220-260 м от дневной поверхности.

Трубка «Удачная-Западная» характеризуется удлиненной в северо-западном направлении эллипсовидной формой, приобретая с увеличением глубины более

изометричную форму. Восточное тело в горизонтальном сечении имеет вид эллипсоида, вытянутого в северо-восточном направлении, обладает плавным выдержанным контуром с отдельными сравнительно крупными заливами и выступами.

Вещественный состав кимберлитового месторождения трубки «Удачная» в основном выполнен породами двух фаз внедрения. Одна из фаз представлена порфировыми кимберлитами, другая — автолитовой кимберлитовой брекчией. Указанные разновидности отличаются между собой структурными особенностями, количеством и формой выделений оливина, насыщенностью ксеногенным материалом и т.п. Четких контактов между разновидностями кимберлита почти нет, чаще всего границы постепенного, плавного характера.

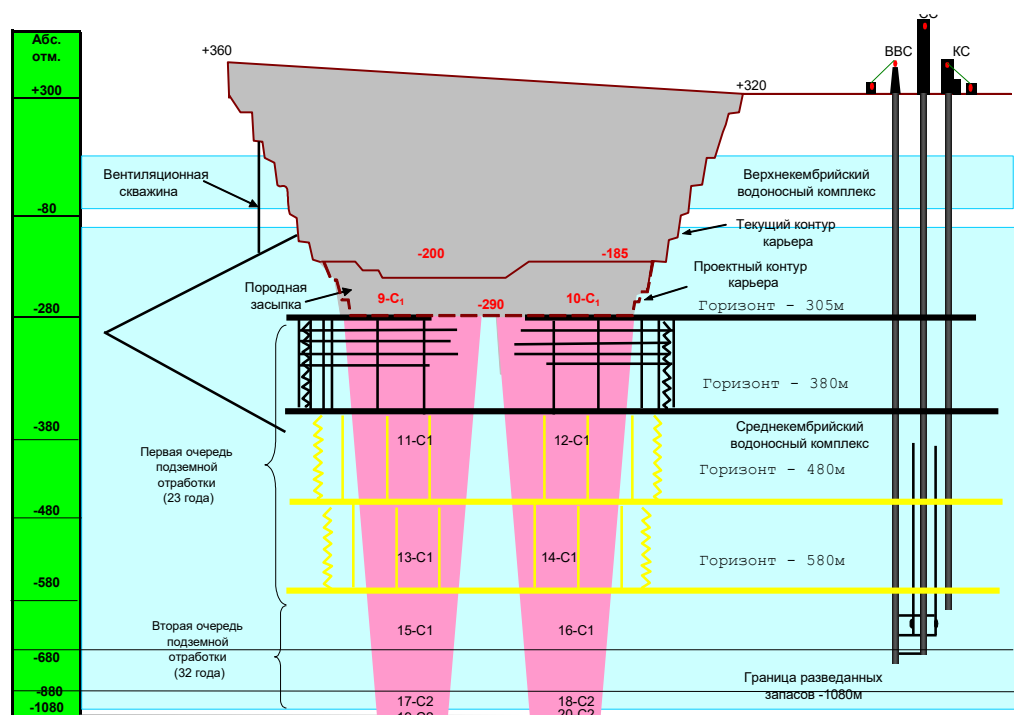


Рис. 5.30. Схема отработки запасов месторождения трубки «Удачная»

Создание модели кимберлитового месторождения трубки «Удачная», как и рассмотренных выше геологических объектов, базируется на применении математической статистики. Выбор методов и приемов статистического анализа зависит от качества исходного материала и его представительности (объем выборки, методика определения признака, вес пробы и др.). Степень надежности результатов статистических расчетов и корректность созданной модели зависит от качества исходной информации и от наличия того или иного закона распределения изучаемого признака. Поскольку алмазоносность является вещественным показателем, то, как известно, для последних не всегда, но довольно часто, выполняется нормальный либо логнормальный закон распределения.

При наличии достаточно богатого накопленного материала (порядка 13000 проб), были проведены исследования по определению закона распределения алмазов месторождения трубки «Удачная» как общего содержания, так и по всем гранулометрическим классам. Исходные данные сформированы на основе различных стадий разведки месторождения: по результатам разведки глубоких горизонтов,

доразведки и эксплоразведки Результаты по опробованию объединены в один общий файл с расчетом пространственного расположения каждой пробы.

Все статистические исследования и расчеты проводились при помощи пакета Datamine с использованием геостатистического, геологического и графического модулей данного пакета программ.

Следует отметить, что важным фактором при расчетах является плотность опробования. Не менее важным фактором для получения в конечном счете корректных результатов является и представительность веса проб, что играет значительную роль при расчетах и определении закона распределения гранулометрических классов. На Рис. 5.31 представлена гистограмма весовых значений опробования кимберлитового месторождения.

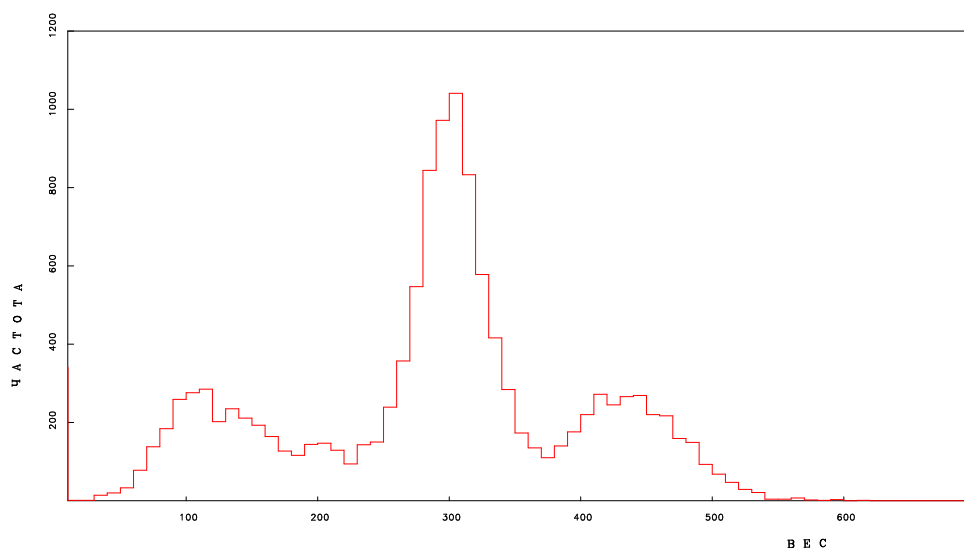


Рис. 5.31. Гистограмма весовых значений опробования

Как видно из графика, наиболее распространенным весовым значением проб являются пробы весом 300 кг.

На основе анализа исходных данных получены следующие выводы:

- В первом приближении содержание алмазности кимберлитового месторождения трубка «Удачная» имеет нормальный характер распределения. Достаточно хорошо приближение к нормальному закону распределения проявляется по общему содержанию как в целом по трубке «Удачная», так и по Восточному и Западному телу месторождения, что объясняется в первую очередь высокой представительностью опробования для расчета данного класса и достаточно плотной, благодаря данным по эксплоразведке, сетью скважин.
- Наличие определенного закона распределения дает возможность корректно применять геостатистические расчеты и исследования, для создания, в конечном счете, наиболее достоверной модели кимберлитового месторождения.

На выбор метода моделирования влияют геологическое строение месторождения, его структурные особенности, представительность выборки, интервал опробования, закон распределения и другие геостатистические параметры. Достоверность геологической

информации является обязательным условием успешного математического моделирования. Ошибки, возникающие в процессе обработки, могут привести к довольно неожиданным результатам.

Решая задачу оптимального метода расчета наиболее достоверной модели по трубки «Удачная», были построены модели с использованием различных методов моделирования и проведен сравнительный анализ полученных результатов с исходной информацией. Кроме перекрестной проверки (кросс-валидейшн), выполняющей трехмерный точечный кригинг-анализ исходных данных, проводился дополнительный анализ реальных и расчетных значений с учетом их расположения в пространстве рудного тела, что позволило оценить и сравнить различные методы моделирования непосредственно по данным месторождения трубки «Удачная». Сравнительный анализ заключался в расчете статистических параметров моделей, определении величины корреляционных связей с исходной информацией, расчете точности моделей и визуального сравнения истинных и расчетных значений (качественный анализ).

Таблица 5.1. Сравнительные характеристики моделирования геологического блока.

Параметр	Метод расчета			Исходные данные
	Линейный	Кригинг	Обратные расстояния	
Коэфф. корреляции	0.93	0.98	0.91	1.00
Ср. значение в %	93.25	97.22	89.29	100.00
Дисперсия	0.71	0.61	0.77	0.93

С учетом выше сказанного, за основной рабочий метод интерполяции принят кригинг. По сравнению с другими оценочными методами, кригинг дает несмещенную оценку среднего содержания по всему объему рудного тела и также, что немаловажно, минимальную дисперсию оценки.

Одним из важных этапов, предшествующих моделированию любого геологического объекта, является изучение корреляционных связей исходных данных как в пространственном отношении, так и между изучаемыми признаками. Наличие достаточно высокой корреляции дает возможность рассчитать более полные математические модели, используя методы регрессионного анализа. При анализе исходной информации отмечается высокий коэффициент корреляции между гранулометрическими классами +4,+2 и +1. Кроме того, по месторождению трубки «Удачная» выявлены корреляционные связи между такими физическими параметрами как плотность, крепость, измельчаемость и влажность. Наличие коррелируемости между этими параметрами компенсирует недостаточность исходных данных, особенно на более глубоких горизонтах.

Очень важным этапом при геостатистическом исследовании и моделировании геологических объектов является построение вариограмм и их анализ. Вариограммная функция представляет собой пространственную характеристику исследуемого признака. Поскольку последующее моделирование происходит на точечном основании, экспериментальная вариограмма заменяется моделью(теоретической вариограммой), имеющей те же характеристики, что и рассчитанная вариограмма. Подбор моделей к полученным вариограммам может производиться как визуально, так и методами регрессионного анализа (наименьших квадратов). Второй способ позволяет получить

более точные оценки, однако имеет некоторые ограничения, не позволяя эффективно использовать интуицию пользователя и вторичные знания об исследуемом массиве. Таким образом, чисто математический подход может привести к получению нестандартных для геостатистики функций. Необходимо отметить, что небольшие (в разумных пределах) колебания большинства параметров вариограммной модели мало влияют на результаты оценки методом кригинга, то есть визуальное определение параметров модели вполне допустимо. Особенно тщательно необходимо было подходить к оценке эффекта самородков (C_0), так как это наиболее влиятельный и чувствительный фактор модели.

На Рис. 5.32 приведен пример вариограммной функции и подобранной модели.

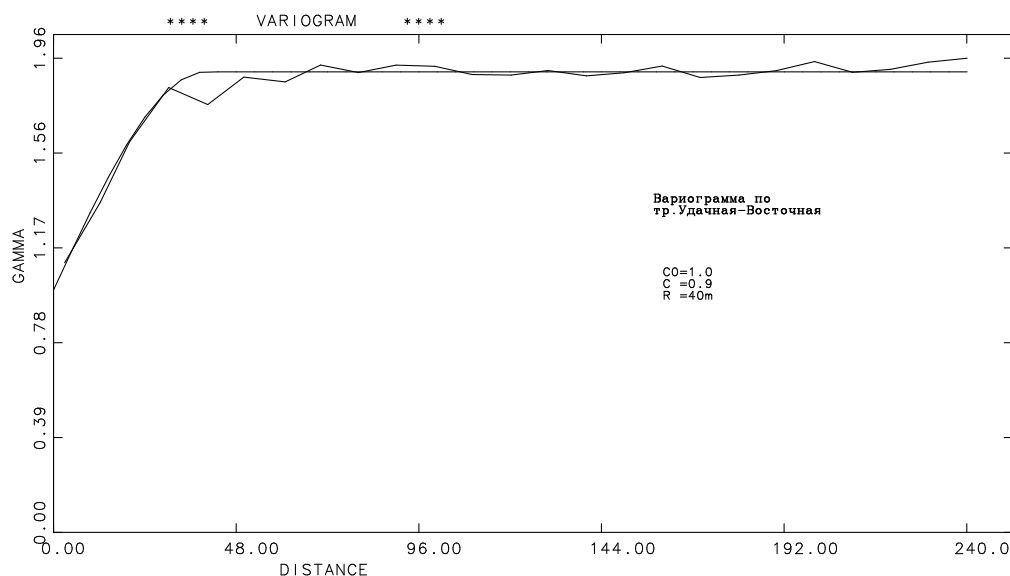


Рис. 5.32. Пример вариограммной функции и подобранной модели для трубки «Удачная»-Восточная, где C_0 - эффект самородков, C - разность между порогом вариограммы и C_0 , R - зона влияния

Согласно отработанной методике общая последовательность операций моделирования была следующая:

1. Объединение данных различных этапов разведки в один файл в единой системе координат с последующим расчетом пространственного расположения каждой пробы;
2. Построение каркасных моделей на основе файлов периметров отдельно по каждому рудному телу;
3. Создание блочной модели с размерами ячеек $20 \times 20 \times 15$. В системе DATAMINE был использован простейший тип трехмерной модели - прямоугольная пространственная решетка, где каждая ячейка имела одинаковую ориентацию и содержала характеристики для каждой рассчитываемой переменной, в том числе и величину ошибок. Размер ячеек зависел от требуемой на данном этапе точности модели, структурной сложности и определялся, в первую очередь, применимостью модели непосредственно для производства горных работ. Система Datamine имеет возможность дополнительно разбивать каждую ячейку на подъячейки, при этом следует учитывать, что размеры модели возрастают в геометрической прогрессии.

4. Расчет вариограмм и подбор вариограммных моделей по каждому гранулометрическому классу.
5. Моделирование методом кригинга отдельно по каждому телу, применение иных методов моделирования (при необходимости) при расчете физических параметров.
6. Объединение всех расчетов в единый файл модели, содержащий данные по всему объему месторождения.

Геостатистическая модель кимберлитового месторождения Удачная рассчитана по следующим признакам:

- общее содержание алмазов
- содержание алмазов по гранулометрическим классам от +8.0 до -0.5
- плотность пород
- крепость
- влажность
- измельчаемость

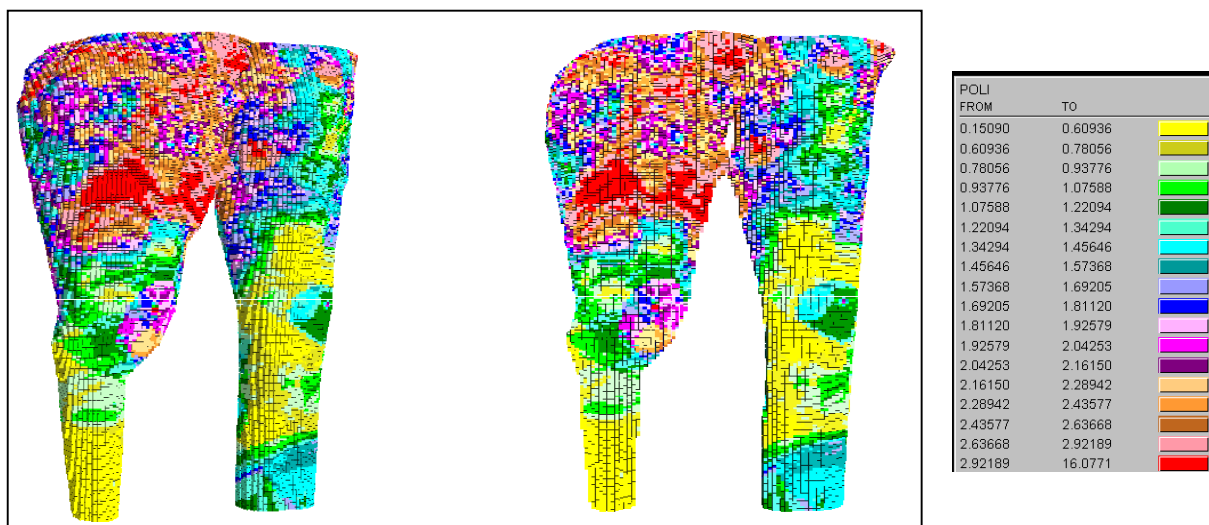


Рис. 5.33. Модель трубки «Удачная» по общему содержанию распределения алмазов

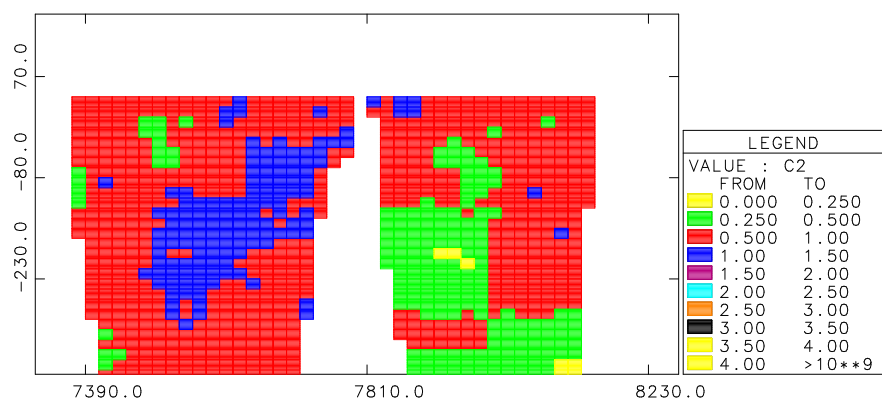


Рис. 5.34. Модель трубки «Удачная» по распределению алмазов класса +2.0-1.0

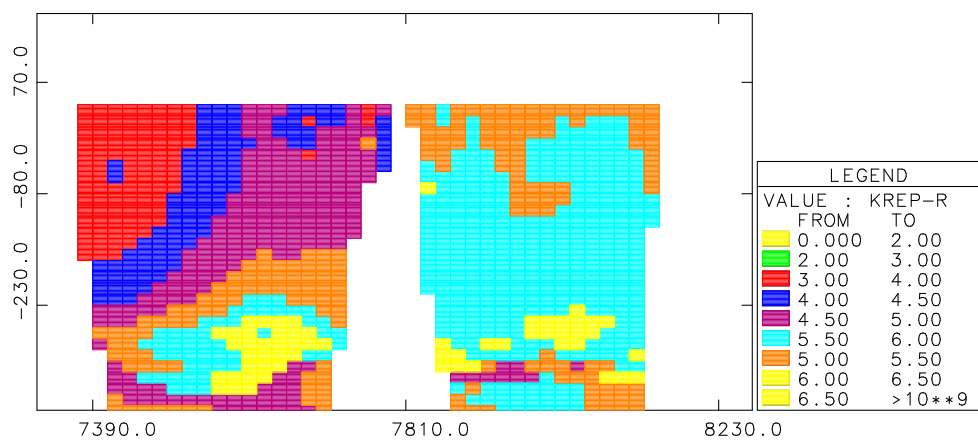


Рис. 5.35. Модель трубки «Удачная» по крепости пород

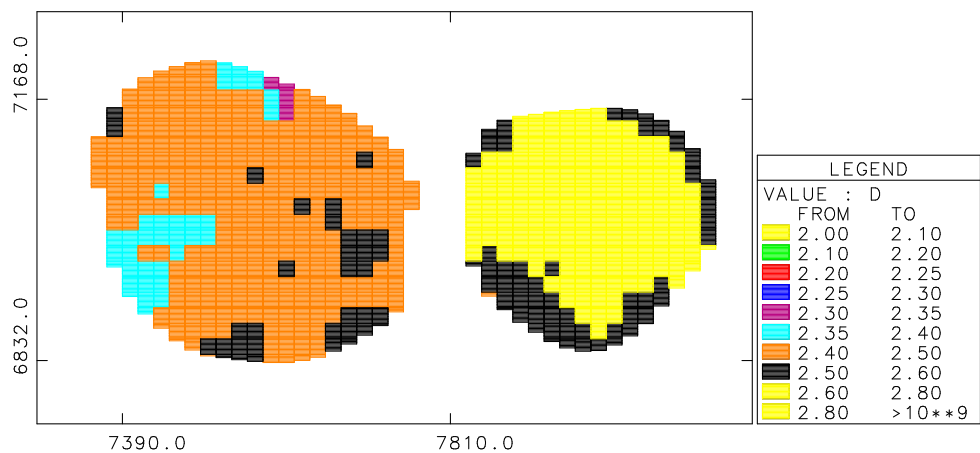


Рис. 5.36. Модель трубки «Удачная» по плотности

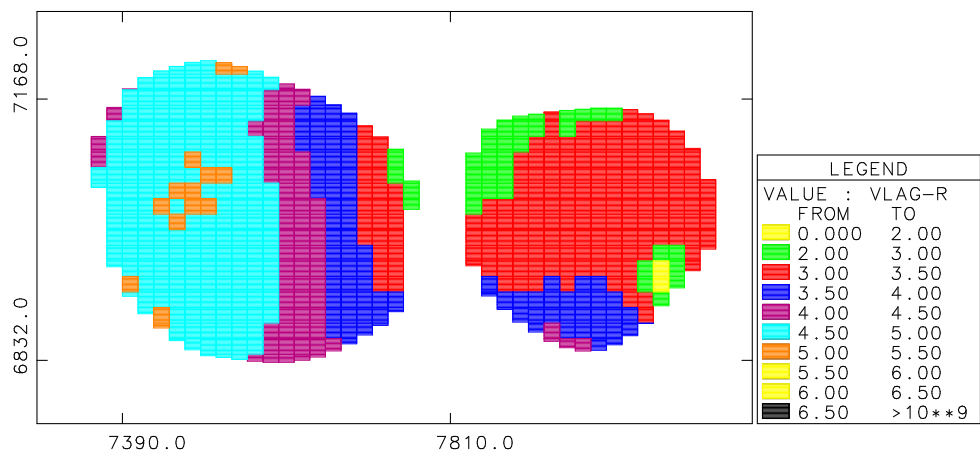


Рис. 5.37. Модель трубки «Удачная» по влажности пород

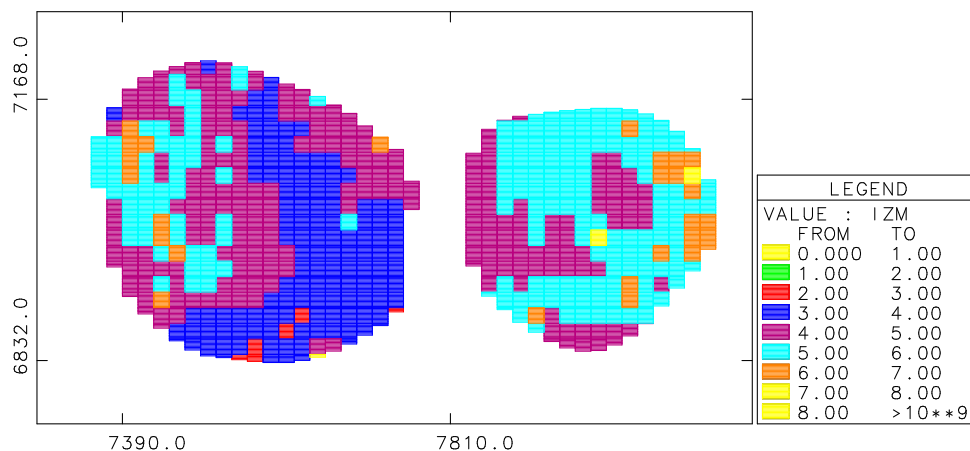


Рис. 5.38. Модель трубки «Удачная» по измельчаемости пород

Конечной целью геостатистических расчетов и исследований является создание достоверной математической модели кимберлитового месторождения с наиболее возможной на данном этапе точностью.

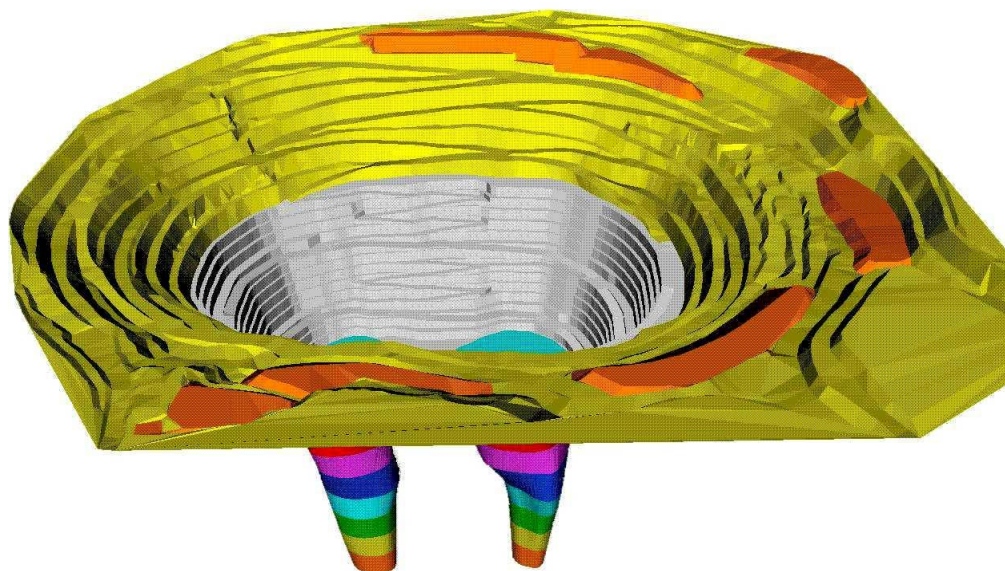


Рис. 5.39. Каркасная модель карьера и рудного тела трубки Удачная

5.6 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «БОТУОБИНСКАЯ»

Если месторождение трубка «Нюрбинская» имеет более или менее однородный вещественный состав и при геолого-математическом моделировании нет особой необходимости в учете разновидностей кимберлитов, то трубка «Ботуобинская» в этом отношении имеет более сложное строение и несколько разновидностей кимберлитов, имеющих значимые различия по общему содержанию алмазов.

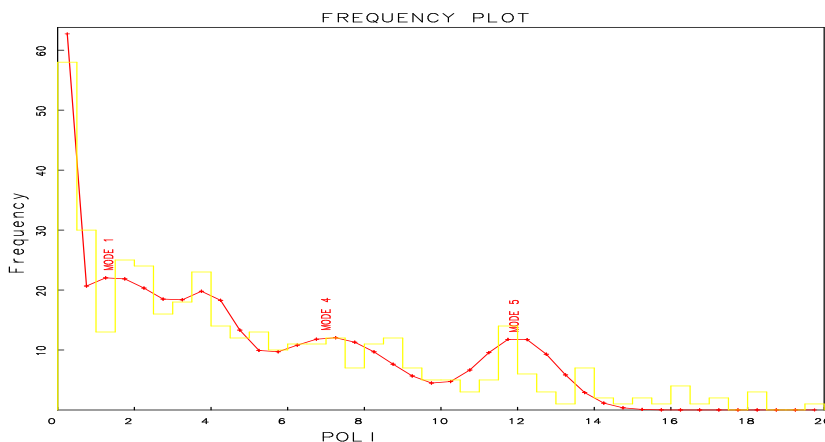


Рис. 5.40. Гистограмма общего содержания алмазов трубки «Ботуобинская»

Как видно из представленной гистограммы по общему содержанию алмазов выделяются несколько разновидностей, имеющих некоторые отличия по среднему значению. Эти разновидности имеют геологическое объяснение и пространственную привязку в объеме рудного тела.

Геолого-математические модели для тр. Ботуобинской создавались двух видов. Первая геолого-математическая модель рассчитывалась по геологическим блокам, с учетом разновидности кимберлитов для каждого выделенного блока. Поскольку представленные разрезы по геологическим линиям не дают достаточно уверенного и точного определения границ выделенных разновидностей кимберлитов в пространстве рудного тела, было проведено моделирование с использованием данных по скважинам и на основе моделей определены границы (внутриблочные) разновидностей кимберлитов. Таким образом, расчет геолого-математических моделей проводился в несколько этапов, учитывающих как выделенные геологические блоки, так и разновидности кимберлитов.

Другой тип геолого-математической модели проводился на основе выделенных различий по среднему содержанию. Поскольку выделенные (по ср. содержанию) разновидности имеют достаточно уверенную пространственную привязку, то это дало возможность в несколько этапов- создать геолого-математическую модель распределения общего содержания алмазов в пространстве рудного тела. Обе созданные модели имеют высокий коэффициент корреляции, некоторые различия вызваны разным подходом к созданию моделей распределения алмазов. При расчетах геолого-математических моделей учитывался как вес проб, так и длина интервала опробования.

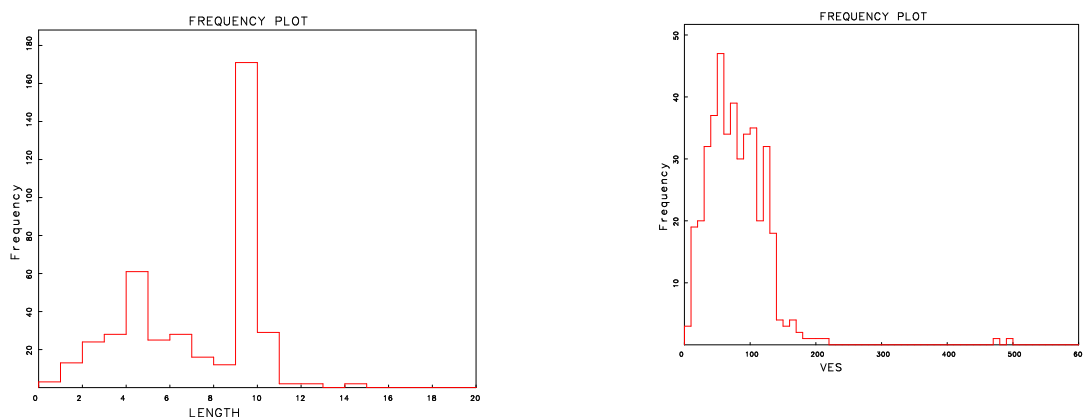


Рис. 5.41. Гистограммы по весу и интервалу опробования трубки Ботуобинская

Создание и расчет геолого-математических моделей проводился методом кригинга, позволяющего минимизировать дисперсию и рассчитывать несмещенную оценку изучаемого признака. Для расчета методом кригинга были рассчитаны вариограммы и подобраны к ним модели. Для определения параметров подобранной модели проводилась регуляризация и определялись основные параметры, необходимые при расчете выбранным методом. Пример расчетных вариограмм и подобранных к ним моделей представлен на Рис. 5.42.

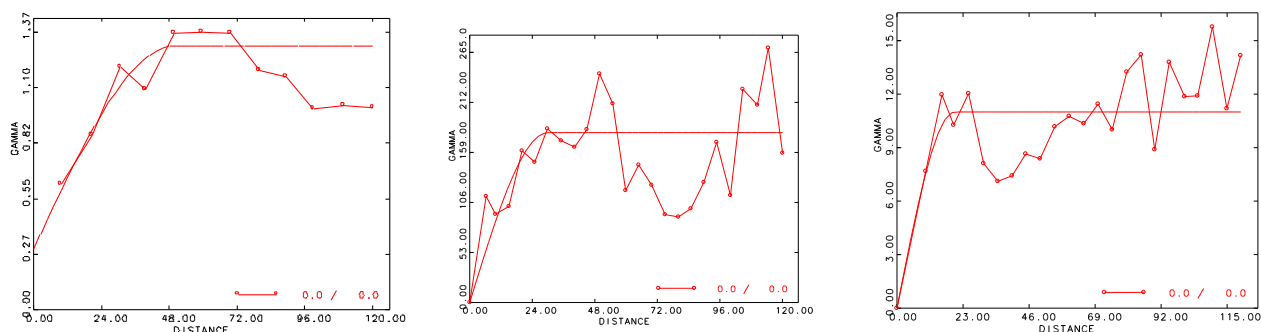


Рис. 5.42. Вариограммы и модели вариограмм для построения модели трубки Ботуобинская

Таким образом, при расчете геолого-математической модели учитывалась геологическая блокировка рудного тела, выделенные разновидности кимберлитов и разновидности, определенные по средним значениям общего содержания алмазов.

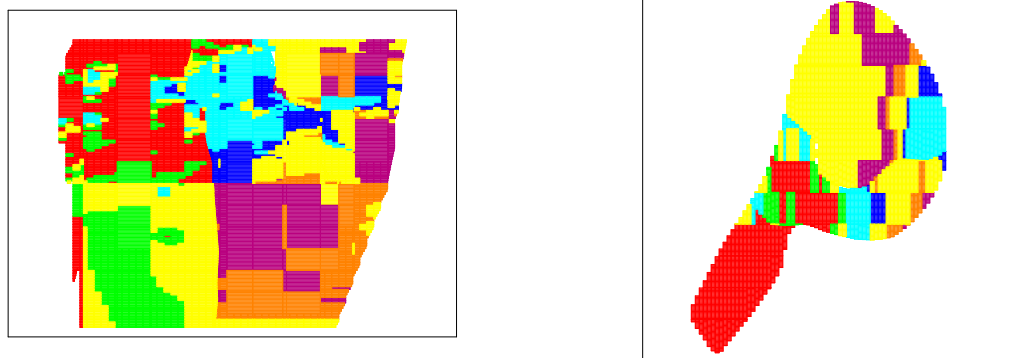


Рис. 5.43. Модель общего содержания алмазов трубки «Ботуобинская»

По данным расчета геолого-математической модели изменились (в сторону увеличения) средние содержания выделенных геологических блоков. И если изменения средних содержаний произошли незначительно (сотые доли процентов), то при подсчете объемов руды есть существенные отличия. Отличия эти вызваны, скорее всего, различными методами подсчета объемов.

Система Datamine использует для подобных расчетов каркасную модель рудного тела, учитывающую пространственную геометрическую изменчивость контуров руды. В расчетах использовался простейший (правда, апробированный временем) метод оценки средней площади. В результате сравнения подсчета запасов с данным геологической разведки и расчетной геолого-математической модели, получено увеличение запасов по трубке «Ботуобинская» для геологического блока 1 – на 1.1%, а для геологического блока 2 – на 15%. В среднем на 8% по сравнению с данными опробования.

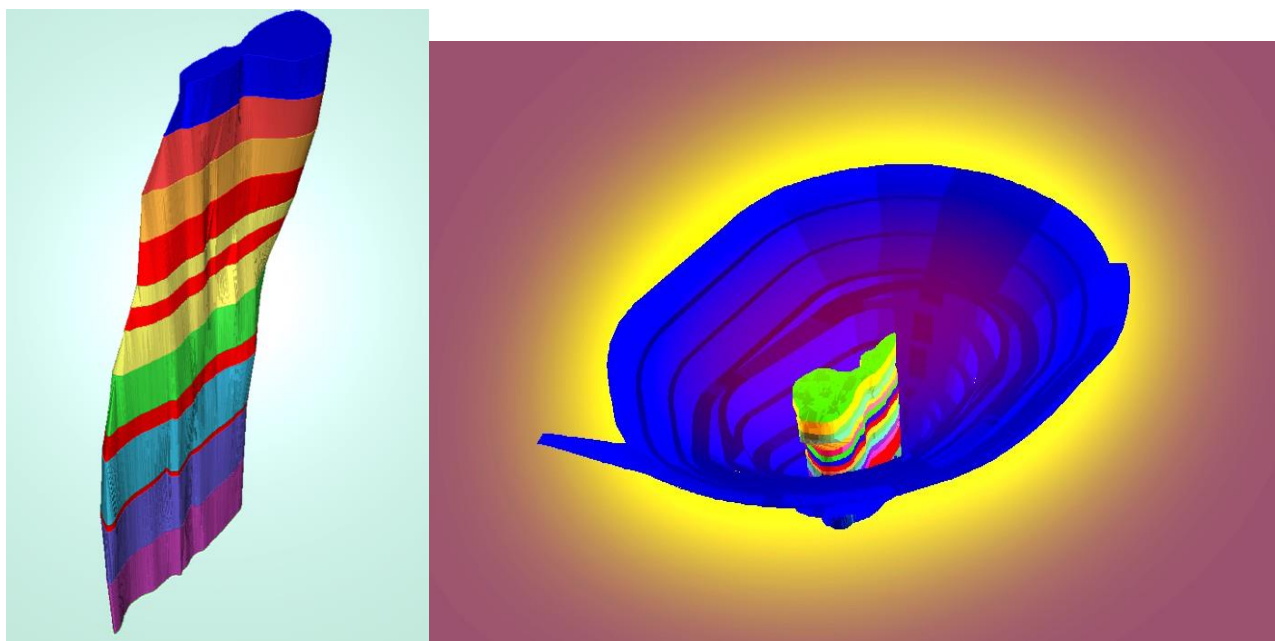


Рис. 5.44. Каркасная модель месторождения трубки Ботубинская и модель проектного контура карьера с рудным телом

5.7 МОДЕЛЬ ТРУБКИ «КАМАЧИЯ»

Геологическое строение месторождения.

Перекрывающие породы на трубке "Камачия" над рудным телом представлены техногенными отложениями: отвалы прежних разработок пойменных и русловых аллювиальных отложений в виде заторфованных и илистых супесей. На остальной части перекрывающими породами являются пески и супеси формации Калахари. Пески мелкие, участками глинистые, до супесей, часто охристые, красноватые и рыжие, иногда межформационные прослойки конгломератов и глин.

Вмещающие породы. Кимберлитовмещающие гнейсы наиболее полно изучены в районе трубки «Катока». На месторождении «Камачия» до глубины 10-25м они подвергнуты глубокому химическому выветриванию и представлены сапролитами – суглинками плотными, твердыми, тугопластинчатыми с унаследованной текстурой полосчатых перемятых гнейсов. От 10-25 до 25-40 м наблюдается зона глинисто-дресвянного элювия. С 25-40 м в разрезе кары выветривания преобладают дресвяные, дресвяно-щебенистые образования гнейсов и кварцитов с размерами обломков от долей до 10 см. и более выветрелых, малопрочных, слабосцементированных мелким рухляком и элювиальным суглинком. Ниже коры выветривания залегают коренные архейские гнейсы, затронутые в верхах разреза вторичной кальцитовый минерализацией и трещиноватостью.

На трубке «Камачия» вмещающие породы вскрыты всего 11-ю скважинами на глубину от 0,3-2,0 до 9,2-14,7 м в контуре рудного тела. В северной части трубки это монолитные гнейсы с проявленной трещиноватостью, в остальной части рудного тела гнейсы брекчированы и трещиноваты с жилами кальцита и хлорита, а также с инъекциями кимберлитов. Данные о вмещающих породах на нижних горизонтах полностью

отсутствуют, поэтому для них физико-механические свойства приняты по аналогии с трубкой "Катока".

Кимберлитовые породы трубки «Камачия» сильно выветрены до глубины 10–30 м, где они изменены до глинистого состояния, легко измельчаемы и легкообогатимы. В контуре кимберлитовой трубки «Камачия» на поверхность на $\frac{1}{4}$ площади выходят гипабиссальные порфирированные кимберлиты, на остальной части – кратерные туфогенно-осадочные породы.

Краткая характеристика кимберлитов трубки «Камачия». По вещественному составу и характеру алмазонасности в пределах трубки выделяются три обособленных в пространстве типа руд:

- гипабиссальный порфировый кимберлит (ГПК) не расчлененный с кимберлитовой брекчией, представленный в основном на глубоких горизонтах трубки, выходит на поверхность в виде серповидного тела на западе трубки. Этот тип руды характеризуется максимальной алмазонасностью, относительно высокой прочностью. Плотность руды в зависимости от степени выветрелости колеблется от 2,04 до 2,25 т/м³. Из минералов тяжелой фракции преобладает пироп, в небольших количествах пикроильменит, хромдиопсид, циркон;

- кимберлитовая туфобрекчия (КТБ), перекрывающая ГПК, как правило, состоящая на 10-40% из пустых вмещающих пород. Плотность руды в среднем 2,09 т/м³. Из минералов тяжелой фракции в небольших количествах встречается пироп, хромдиопсид, циркон, гидроокислы железа, пикроильменит.

- туфоосадочные породы с примесью кимберлитов венчают разрез вулканогенно-осадочные образования кратерной фации: в виде веерных образований в кратерной зоне характеризуются очень легкой измельчаемостью. Плотность руды в среднем 2,13 т/м³. Из минералов тяжелой фракции встречаются в очень малых количествах пироп и хромдиопсид.

Как туфоосадочные породы кратерной фации, так и кимберлитовая туфобрекчия хорошо сохранены в верхней части трубки «Камачия».

Построение модели месторождения

Кимберлитовая трубка «Камачия» в разведанных верхних горизонтах представлена на 60% слабоалмазонасными (сотые доли карат) кратерными вулканогенно-осадочными образованиями и на 40% - кимберлитовыми породами, из которых более $\frac{1}{4}$ сложены убогоалмазонасными кимберлитовыми туфобрекчиями, а на продуктивные порфирированные кимберлиты приходится только около 30% от общей массы разведанных запасов.

В то же время в разрезе вулканогенно-осадочной толщи отмечаются участки насыщенные включениями кимберлитов и продуктами их разрушения, характеризующиеся относительно повышенной алмазонасностью. Поэтому, учитывая высокую стоимость алмазов рассматриваемого месторождения (102 долл/карат) и частую встречаемость крупных камней, весом 10-20 и более карат, здесь выделены два блока, по которым подсчитаны запасы с бортовым содержанием 0,05 кар/т, которые целесообразно включать в качестве шихты при отработке более богатых руд.

Контур запасов в подсчетных блоках определен по разведочным и картировочным скважинам с частичной геологической экстраполяцией и интерполяцией результатов опробования при геометризации отдельных блоков.

Исходными данными для подсчета запасов тр. «Камачия» и создания геолого-математической модели послужили:

- объемно-каркасная модель трубки «Камачия» до разведанной глубины 100 м, созданная с применением программного обеспечения Datamine;
- геологические разрезы по линиям;
- результаты кернового опробования геологоразведочных скважин.

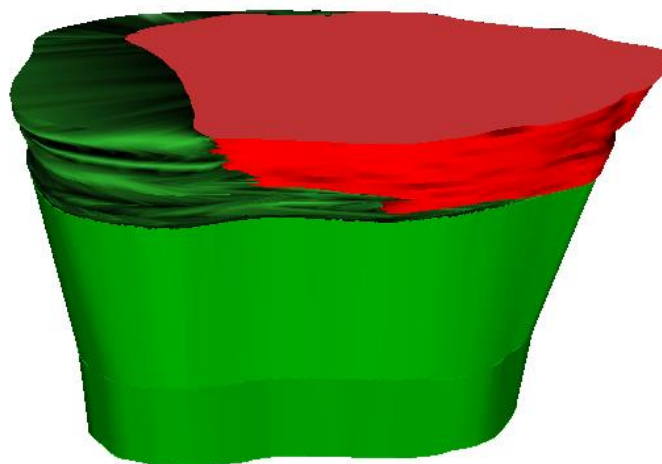


Рис. 5.45. Каркасная модель месторождения тр. Камачия

-  кимберлиты гипабиссальной и жерловой фации;
-  вулканогенно-осадочные породы.
-  прогнозная часть объемной модели до горизонта 430м

Модель месторождения по распределению содержания алмазов в пространстве рудного тела создавалась до глубины 100м, более глубокие горизонты практически не изучены горными выработками. Модель создавалась по наработанной методике, для каждого выделенного геологического блока. Общая модель по содержанию алмазов представлена на Рис. 5.46.

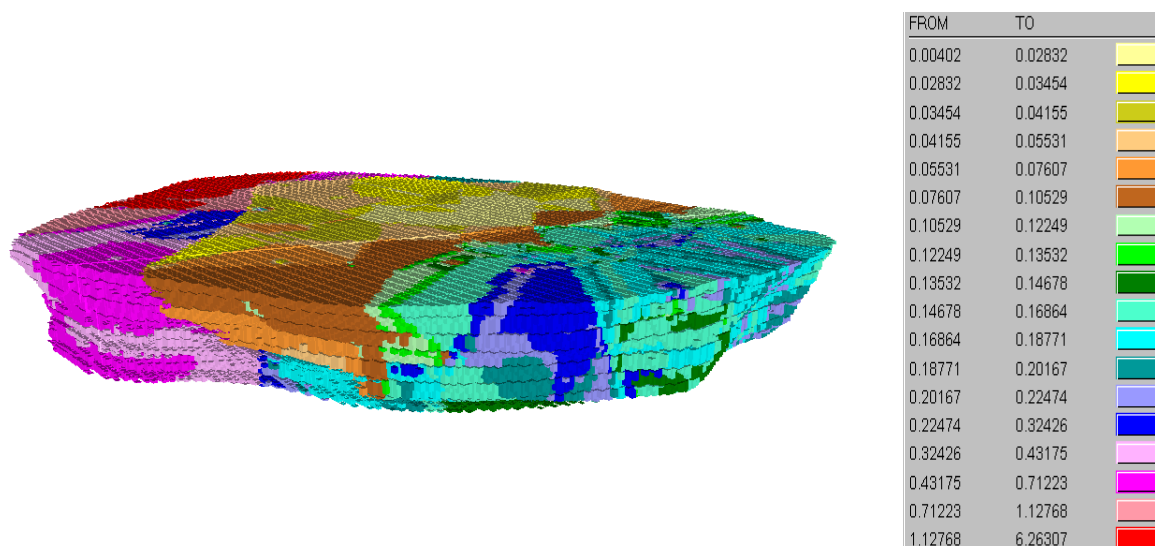


Рис. 5.46. Модель месторождения по общему содержанию алмазов

Кроме представленных примеров геолого-математического моделирования были созданы модели для коренных кимберлитовых месторождений: трубка «Мир», трубка «Интернациональная», трубка «Дачная», трубка «Айхал», для россыпных – месторождение Горное.

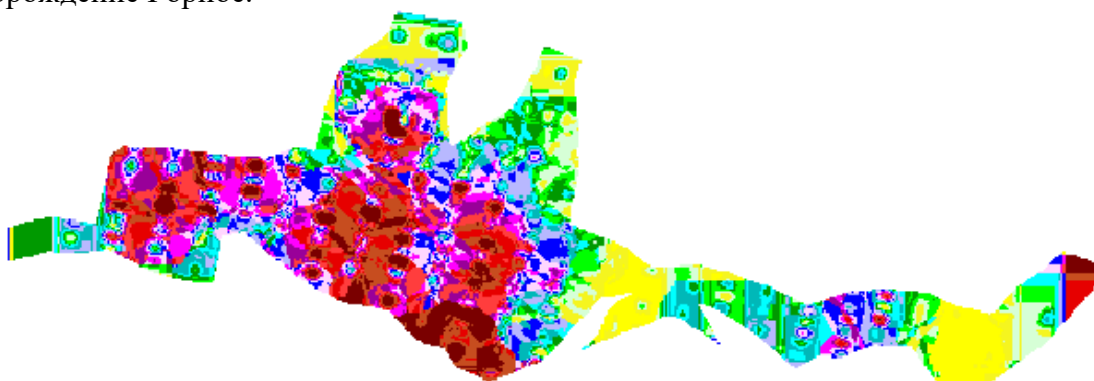


Рис. 5.47. Модель россыпного месторождения Горное по общему содержанию алмазов

Глава 6. Оптимизация открытой разработки кимберлитовых месторождений

Открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых характеризуется относительной дешевизной, высокой скоростью строительства карьеров, большой производительностью, небольшими потерями и по этим причинам является основой технического прогресса в большинстве горнодобывающих отраслей.

Для преодоления возникающих проблем и выживания горнодобывающих предприятий в условиях рынка в первую очередь требуется тщательная проектная проработка границ, кондиций, мощности, порядка развития горных работ, вскрытия и календарного плана, обеспечивающих экономичную и планомерную добычу полезного ископаемого.

Таким образом, создание методов обоснования главных параметров карьеров является перспективным направлением в области открытой разработки месторождений полезных ископаемых.

Каждое месторождение полезных ископаемых, разрабатываемое открытым способом, обладает набором некоторых объективных характеристик, которые должны быть вскрыты и изучены в процессе предпроектных исследовательских и проектных работ. Геометрический анализ карьерного поля проводится на начальных стадиях изучения процесса разработки месторождения. С его помощью определяются закономерности изменения объемов и качества полезного ископаемого, вовлекаемого в разработку, объемов вскрышных работ, ожидаемых укрупненных технико-экономических показателей в зависимости от положения контуров карьера и порядка развития его рабочей зоны. В результате анализа устанавливаются области экономически эффективной открытой разработки, предпочтительные направления и последовательность отработки запасов, общий порядок развития горных работ, которые затем уже уточняются и конкретизируются с учетом технологии горных работ, схем вскрытия, организации грузопотоков, работы горнотранспортного оборудования и т.д.

Уникальность горно-геологических объектов месторождений алмазов предъявляют повышенные требования к построению адекватных математических моделей этих объектов, формализованному математическому описанию горно-геометрических задач и разработке оптимизационных методов их решения с целью наиболее полного выявления объективных характеристик месторождения, разрабатываемого открытым способом.

При проведении оптимизации математическая модель месторождения формируется по данным геологической разведки исходя из технологических требований добычи и переработки полезного ископаемого с использованием разработанных теоретических основ моделирования.

На стадии проектирования карьеров наиболее ответственные, трудно исправимые и влияющие на всю последующую жизнь предприятия решения принимаются при выборе главных параметров карьера, к которым относятся размеры карьера, запасы, объем вскрыши, производственная мощность по полезному ископаемому и горной массе, срок существования, и определяющих их конечных контуров карьера, кондиций на полезное ископаемое, схемы вскрытия, порядка развития горных работ, системы разработки и календарного плана добычи и вскрыши.

Среди главных решений, принимаемых при проектировании, существует группа - конечные контуры карьера и последовательность отработки запасов, выбор которых непосредственно определяется геологическими факторами, кондициями на полезное ископаемое и физико-механическими свойствами горных пород, проявляющимися в

первую очередь в распределении полезных компонентов в пространстве месторождения и в устойчивых углах откосов бортов карьера. На принятие этих решений оказывает влияние и выбираемая технология горных работ, и механизация и внешние факторы, но они уже накладываются на данные природой уникальные горно-геологические условия.

В настоящее время в проектной практике при выборе границ карьера, кондиций и последовательности отработки запасов все еще преобладает метод вариантов. Метод вариантов отличается гибкостью и практически неограниченными возможностями, когда нужно учесть разнообразные трудно формализуемые условия решения задачи. Наиболее крупными его недостатками являются высокая трудоемкость, даже при использовании ЭВМ, и отсутствие гарантий в том, что наилучшее решение не пропущено.

Таким образом, возникает проблема создания оптимизационных методов горно-геометрического анализа, облегчающих его проведение и позволяющих гарантировать принятие оптимальных решений.

За последние годы отечественного и зарубежного опыта применения ЭВМ при проектировании и планировании открытых горных работ накопилось большое количество разнообразных методов моделирования месторождений и карьеров. Несмотря на это, в настоящее время ощущается производственная необходимость в более фундаментальной разработке теоретических основ математического моделирования месторождений и карьеров, обеспечивающих создание эффективных пакетов программ для анализа и надежной оптимизации отработки запасов.

Определение наиболее выгодных с экономической точки зрения контуров карьеров является одной из наиболее важных проблем горнодобывающей промышленности. Сегодня в рыночных условиях горнодобывающие компании прикладывают все больше усилий для уменьшения затрат, минимизации неэффективных действий и максимизации ценности проектов. Для вычислительного обеспечения всех стадий проектирования и планирования добычи требуется высокопроизводительная компьютерная технология, в том числе - программное обеспечение оптимизации карьеров по прибыли, позволяющая максимизировать чистую приведенную стоимость (Net Present Value) минеральных запасов в расчете на весь срок жизни рудника. Эта компьютерная технология должна легко интегрироваться с имеющимися на производстве средствами математического моделирования и автоматизированного подсчета запасов.

В данной главе рассмотрены возможности специализированных программ расчета экономически наиболее выгодной последовательности этапов разработки карьеров в период открытой отработки запасов алмазоносных месторождений. Определены необходимые условия решения задачи оптимизации границ карьеров по чистому дисконтированному доходу (NPV) с учетом ограничений производительности карьеров по горно-геологическим условиям. Приведены результаты сравнительного анализа планирования горных работ с помощью предлагаемых различными компаниями программ, основными из которых являются Gemcom Whittle, Earthworks NPV Scheduler и MineMax Planner.

Приведены примеры использования программ расчета оптимальных контуров карьеров и выполнено сопоставление оптимизаторов по ряду критериев эффективности и удобства работы пользователя – горного инженера проектировщика.

6.1 МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГРАНИЦ КАРЬЕРОВ

Известные традиционные методы проектирования и планирования добычи, разработанные для открытого способа отработки запасов месторождений, использовали, главным образом, аналитические или графические схемы расчета, не позволяющие

выйти на оптимальные по экономическим параметрам решения [4, 90]. Традиционно применялся метод вариантов с минимизацией объемов вскрышных работ путём сравнения граничного и контурного коэффициентов вскрыши.

Общая постановка задачи определения границ карьера состоит в следующем. Для модели месторождения задаются v , c , m — функции плотности, определяемые в каждой точке трехмерного пространства; при этом $v(x, y, z)$ — себестоимость руды; $c(x, y, z)$ — стоимость разработки руды и пород; $m(x, y, z) = v(x, y, z) - c(x, y, z)$ — прибыль от разработки данного объема.

Пусть функция $\alpha(x, y, z)$ определяет угол в каждой точке пространства и S является семейством поверхностей, наклон которых ни в одной точке по отношению к постоянной горизонтальной плоскости не превосходит α . Если обозначить через V семейство объемов, соответствующих семейству поверхности S , то требуется найти среди всех возможных формирований объемов тот, который максимизирует интеграл

$$\int_V m(x, y, z) dz dy dz \quad (6.1)$$

Другими словами, требуется найти такие границы открытых горных работ, в которых при разработке месторождения будет получена максимальная прибыль. При этом должна быть достигнута минимизация количества отходов в условиях экономических, геологических и технологических ограничений.

Проблема планирования добычи в карьере может быть определена как отыскание последовательности выемки блоков в таком порядке, чтобы максимизировать чистый дисконтированный доход при различных ограничениях:

- Производительность фабрики обогащения
- Объем извлечения в заданный период времени
- Ограничения на смешивание типов руд
- Ограничения, связанные со складированием руды и отвалами пород
- Ограничения по логистике

Следуя обозначениям, принятым в работе [100] вводятся следующие параметры и ограничения:

T число этапов планирования добычи.

N число блоков рудного тела.

c_i^t прибыль (в NPV) от добычи блока i в период t .

O подмножество рудных блоков.

W подмножество блоков пустой породы.

t_i масса блока i .

m_t масса обогащаемой руды в период времени t .

S_i множество блоков, которые необходимо удалить до отработки блока i .

$x_i^t = \begin{cases} 1, & \text{если блок } i \text{ отработан в период времени между } l \text{ и } t \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

ℓ_0^t нижняя граница массы руды, обогащенной в период времени t .

u_0^t верхняя граница массы руды, поступающей на обогащение в период времени t .

u_w^t верхняя граница массы породы, добытой в период времени t .

Тогда формулировка проблемы оптимизации добычи в карьере записывается следующим образом:

Необходимо максимизировать

$$Z = \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^N (c_i^{t-1} - c_i^t) x_i^{t-1} + \sum_{i=1}^N c_i^T x_i^T \quad (6.2)$$

где

$$\begin{aligned} \sum_{i \in O} t_i x_i^1 &= m_1 \\ \sum_{i \in O} t_i (x_i^t - x_i^{t-1}) &= m^t, \quad t=2,3,\dots,T. \\ \sum_{i \in W} t_i x_i^1 &\leq u_w^1 \\ \sum_{i \in W} t_i (x_i^t - x_i^{t-1}) &\leq u_w^t, \quad t=2,3,\dots,T. \\ x_i^{t-1} &\leq x_i^t, \quad t=2,3,\dots,T. \\ x_i^t &\leq x_j^t, \quad t=1,2,\dots,T, j \in Si; \quad i=1,2,\dots,N; \\ \ell_0^t &\leq m^t \leq u_0^t, \quad t=1,2,\dots,T; \\ x_i^t &= 0,1, \quad \text{для всех } i, t. \end{aligned}$$

Указанные ограничения гарантируют, что должна обеспечиваться заданная производительность фабрики обогащения, а также то, что масса удаляемой в отвал породы не должна превышать предписанные верхние границы. Параметры ограничения также указывают на то, что каждый блок удаляется в заданный период времени (этап отработки) при заданном угле откосов борта карьера.

В 1964 году Лерчсом и Гроссманом [118] был впервые предложен алгоритм на основе теории графов, позволяющий оптимальным образом рассчитывать последовательность выемки регулярных блоков и определять оптимальные контуры предельного карьера на основе заданных геомеханических и экономических параметров отработки.

Расширение применения компьютеров в горном деле за рубежом и в нашей стране способствовало разработке новых математических методов оптимизации границ открытых разработок [Ошибка! Источник ссылки не найден., 67]. В последующие десятилетия в мире главным образом использовались два алгоритма оптимизации карьеров – плавающего конуса и Лерчса-Гроссмана. В настоящее время ведущие поставщики горно-геологического ПО развивают, главным образом, подход на основе алгоритма Лерчса-Гроссмана, хотя имеются работы по программной реализации алгоритмов решения задачи оптимизации на основе максимизации потока.

Хотя основной алгоритм был разработан почти сорок лет назад, но программы оптимизации карьеров по максимуму NPV (или ЧДД – чистого дисконтированного дохода) стали применяться в практике проектирования и планирования горных работ лишь в последние пятнадцать лет [105]. Ранее отсутствовали не только коммерческие оптимизаторы, но и доступные компьютерные продукты подготовки блочных моделей месторождений, общие горные пакеты. Затем появились программы для первых персональных компьютеров. В тот период наши горно-добывающие предприятия по ряду причин не были экономически заинтересованы в кардинальном улучшении дел с планированием. Частично это положение объяснялось перегруженностью текущими краткосрочными делами и неопределенностью долгосрочного планирования производства при нестабильной экономической ситуации в стране. Тем не менее, в эти годы были сделаны значительные успехи в области разработки теории и создании практически работающих программ [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Среди отечественного программного обеспечения в области оптимизации контуров карьеров по прибыли следует отметить программу PRIMEPIT проф. С.Д.Коробова [56], программу автоматизированного построения планов развития

карьеров в составе ПО Интегра (Канцель А.В. и др.) и программный комплекс GeoTech-3D, разработанный в Горном институте Кольского научного центра РАН (авторы Наговицын О.В., Билин А.Л., Смагин А.В.) и др. [14]. Однако отечественные оптимизаторы пока вышли на уровень мировых коммерческих продуктов и уступают зарубежным программам по техническим показателям.

В конце 80 годов прошлого века австралийская компания Whittle Programming выпустила на рынок такие широко известные продукты, как Three-D, Four-D, OptiCut, Four-X. Затем в 90-х годах ими был разработан усовершенствованный интегрированный пакет для оптимизации карьеров Four-X Analyser. Сейчас компания входит в состав фирмы Gemcom и выпускает программный пакет оптимизации Gemcom Whittle.

Сравнительно недавно, в конце 90 –х годов, компания Earthwork на основе математических и программных разработок Б.Тольвинского [124] также выпустила несколько программ для горной промышленности, в том числе программу оптимизации карьеров по методу Лерчса-Гроссмана – MaxiPit, которая затем вошла в состав оптимизирующей системы NPV Sheduler. Эта система предлагает сегодня набор высокотехнологичных компьютерных средств проектирования и планирования открытых горных работ с широким использованием различных методов оптимизации.

Сегодня оптимизация последовательности отработки блоков на основе алгоритма Лерчса-Гроссмана встроена в несколько общих горно-геологические пакетов (таких как Mintec, MedSystem, Lynx, Techbase), однако наиболее известными в данный момент являются отдельно поставляемые программы, такие как Gemcom Whittle (ранее - Four-X Analyser компании Whittle Technology), NPV Scheduler Earthworks Inc. (дочерней компании Datamine) и MineMAX Planner компании MineMax Ltd. Они используются при проектировании и текущей работе на сотнях крупнейших горно-добывающих предприятий мира и зарекомендовали себя как надежные программы оптимизации контуров карьеров по максимуму прибыли.

Применение оптимизации предельных контуров карьера обычно связано с рядом трудностей реализации методики экономической оценки месторождений [17, 130], в том числе с необходимостью предварительной оценки размера ежегодной добычи руды. Например, для расчета оптимальной производительности рудника необходимо иметь сведения о тоннаже и содержаниях полезного компонента в извлекаемой в разные периоды времени руде, производственных затратах, ценах на материалы и металл в течение всего срока работы предприятия. Конечно, вся эта информация не может быть полностью получена, особенно на ранних стадиях освоения месторождения, и поэтому составляет часть прогноза.

Таким образом, оптимизация обычно не может дать однозначного ответа и должна всякий раз пересчитываться в случае существенного изменения какого-либо из определяющих параметров, например, при резких колебаниях рыночной стоимости товарной продукции, цены на металл или цен на алмазы.

Для предприятий с коротким сроком жизни должны также быть учтены дополнительные рыночные факторы. Так, например, цикл изменения цен на цветные металлы составляет 4–7 лет. Поэтому при сроке отработки запасов 4 года можно остаться в проигрыше, оказавшись в пределах “провала” цикла. В реальной жизни размеры конечной продукции горного предприятия находятся под строгим ограничением различных производственных факторов. Одним из наиболее важных из них является размер рабочего пространства карьера или шахты. Рудник реально может увеличить свою производительность за счет расширения рабочего пространства.

На выходе программ оптимизации для каждого «вложенного» карьера обычно рассчитываются:

- экономическое бортовое содержание для полезного компонента
- поток денежных средств (CashFlow), \$

- количество горной массы в контуре карьера, т;
- количество разных типов руд с учетом разубоживания, потерь и бортового содержания, т;
- количество извлекаемого полезного компонента после переработки руды
- оценка NPV, \$
- время работы карьера, лет.

В последнее время ввиду наличия ряда недостатков использования алгоритма Лерчса-Гроссмана для месторождений со сложной геологией и длительным сроком жизни карьеров, начинают появляться разработки оптимизаторов на основе усовершенствованной теории графов [117], динамического линейного программирования [100], генетических алгоритмов с элементами искусственного интеллекта [108]. В последней работе подчеркивается, что проектирование поверхности горной выемки и существующие алгоритмы её оптимизации ограничены в работе стохастическими горно-геологическими свойствами этих выработок, что приводит к неоптимальным результатам. Изменения в базе данных также требуют полного перезапуска этих алгоритмов, приводящих к длительной компьютерной обработке, не позволяющей применять оперативную стратегию. В этой работе разработан алгоритм вычислительного интеллекта (CI) для решения проблем, связанных с ограничениями. CI алгоритм объединяет стохастические модели запасов и цены на продукцию с генерацией экономических блоков и целевой функцией. Алгоритм включает обратный перерасчет погрешности и используется в процессе обучения нейронных сетей с прямой связью для распознавания блочных структур на базе целевых значений.

В работах [127, 131] также были исследованы возможности учета стохастических процессов и потенциальных показателей обогащения на контуры оптимизации карьеров.

6.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ОПТИМИЗАТОРОВ КАРЬЕРОВ

6.2.1 NPV SCHEDULER

Программный продукт NPV Scheduler включает в себя множество функций, автоматизирующих процессы проектирования и планирования карьеров. Программа имеет развитый современный интерфейс пользователя и имеет возможность разностороннего импорта и экспорта информации, а также развитую современную графику с 3-х мерным визуализатором.

Первой частью комплекса является программа Maxipit, которая выполняет оптимизацию по одному из 3-х критериев :

Максимум потока наличности. Программа создает стандартный предельный карьер в соответствии с алгоритмом Лерчса-Гроссмана. Можно использовать ограничения, связанные с определением границ, в пределах которых должен находиться проектный контур карьера.

Максимум извлекаемых запасов. Программа создает карьер, включающий всю руду и породу, которая должна быть для этого удалена. Этот случай может встретиться при отработке месторождений очень ценного сырья (например, драгоценных камней и особенно - алмазов), или в случае, когда стоит задача определение эффективности отработки всего месторождения в целом.

Работа в заданных границах карьера. Вместо создания нового карьера программа использует имеющиеся границы карьера. Вы должны предварительно импортировать в программу поверхность Вашего карьера. Такая ситуация может случиться, если вам,

например, потребуется проверить и улучшить экономические параметры уже спроектированного карьера.

В процессе оптимизации может быть определена оптимальная с учетом максимума NPV последовательность извлечения блоков модели по одному из критериев:

Максимум NPV. Программа находит последовательность извлечения блоков внутри всех оболочек карьеров, обеспечивая самый высокий NPV, используя критерий максимума прибыли.

Оптимизация усреднения руд. Программа находит последовательность извлечения блоков внутри всех оболочек карьеров, удовлетворяя установленным ограничениям по качеству добываемой руды, таким как однородность, содержание вредных примесей, извлечение в заданных пределах, извлечение руды только выше заданного уровня и т.п.

Моделирование месторождения начинается с создания каркасных моделей рудных тел, которые затем заполняются ячейками или блоками. Размер основного блока модели для оптимизации карьеров коренных месторождений алмазов для предварительных расчетов может быть выбран 20 x 20 x 15 м. Размеры ячеек обычно соответствуют размеру сети планируемой эксплуатационной разведки, высота блока равна высоте уступа. На контактах рудных зон с целью соблюдения реальных их очертаний блоки делились на суб-блоки со значительно меньшими размерами. Трехмерная интерполяция содержаний алмазов производилась обычным кригингом и в некоторых случаях методом обратных расстояний. Расчеты и моделирование проводились отдельно для каждого геологического блока, кроме того создавалась модель вмещающих пород, с учетом необходимых физико-механических свойств.

Создание экономической модели месторождения

Все оптимизационные расчеты проводятся на блочной модели месторождения, которая импортируется в оптимизатор из общей горной компьютерной системы, где она была создана (см., например, [15, 17]). При импорте из Datamine, например, модель, имеющая подъячейки, становится регулярной.

Программа используя исходные данные, рассчитывает для каждой ячейки модели дополнительную экономическую характеристику. Это – величина чистой прибыли, которую получит предприятие, если оно добудет руду данного блока, переработает ее и продаст все извлеченные полезные компоненты по установленным ценам на рынке, с учетом затрат на переработку руды, транспортировку и других затрат, необходимых при отработке месторождения.

Оценка блока может быть как положительной, так и отрицательной пустые и вмещающие породы, бедные руды. Программа с помощью входной информации по ценам и затратам рассчитывает экономическое бортовое содержание (для предельного карьера), при котором можно добывать руду с нулевой прибылью. Далее по блочной модели оцениваются все запасы с содержанием выше бортового (руда) и количество пустой породы. Эта модель будет использоваться во всех процессах оптимизации. Если на входе заданы несколько полезных компонентов, содержащихся в комплексных рудах, то программа оценит полную экономическую ситуацию, и для каждого блока модели рассчитает полную экономическую характеристику. Естественно, что в этих условиях не могут быть рассчитаны отдельно экономически бортовые содержания для каждого полезного компонента.

Определение углов откоса бортов карьера для оптимизации

Это одна из основных задач подготовки исходных данных для оптимизации. На данном этапе работа делается приблизительно и с некоторым запасом, т.к. пока еще невозможно совершенно точно привязать к карьере дороги, бермы и т.п. Однако, если далеко отойти от реальности, то проектный карьер будет сильно отличаться от

оптимального, а значит, он уже не будет таковым. Обычная процедура задания этих параметров включает:

- изучение геомеханических характеристик горных пород и расчет устойчивой формы и углов наклона бортов карьера;
- исследование вариантов транспортной схемы карьера для разных этапов его развития;
- корректировку полученных ранее бортов с учетом размещения на них трасс внутренних транспортных потоков;
- привязку полученной информации в пространстве и формирования исходных данных в табличной форме, как этого требует оптимизационная программа.

Зная устойчивые расчетные углы откоса для разных участков бортов карьера, необходимо проверить, насколько соответствуют этим параметрам принятые для проектирования углы откоса уступов, число объединяемых уступов, размеры и конструкция предохранительных и транспортных берм. При этом учитываются тектонические нарушения, зоны ослабленных пород, имеющих достаточно высокую трещиноватость, перекрывающая толща горных пород и ее литология, а также морфология рудного тела.

Теперь необходимо оценить на каком борту будут размещаться транспортные магистрали, и еще раз откорректировать с учетом их ширины и уклона тот или иной участок борта. Далее программе оптимизации необходима следующая информация:

- координаты, ограничивающие каждый регион, где используются особые углы откоса борта карьера;
- азимуты направлений и углы откоса борта в каждом направлении.

Для большого карьера со сложной геомеханической ситуацией может быть задано несколько регионов, в каждом из которых для многих направлений могут быть установлены свои углы откоса борта, учитывающие характеристики вмещающих пород и конструкцию борта. Однако для относительно неглубокого карьера можно предусмотреть одинаковые углы откоса бортов для рудных и вскрышных пород. При планировании размещения автодорог, например, на западном борту карьера он выполняется более пологим.

Проведение расчетов

Второй стадией оптимизации карьера является разбиение всего срока его отработки на этапы. Основная разница между фазами или «вложенными» оболочками карьера и этапами заключается в том, что фаза это условная, а не реальная стадия развития карьера, какой является этап. Фазы создаются без всякого учета горных ограничений, могут размещаться в разных местах месторождения, иметь различные размеры и границы. Они создаются просто как набор фаз карьера, которые получаются при изменении цен руды. В свою очередь, этапы отображают реальную последовательность отработки запасов и следуют всем введенным ограничениям и условиям, например – наилучшему усреднению руды. После получения расчетного карьера производится анализ полученных результатов с точки зрения максимума прибыли предприятия. В этом случае рассматриваются значения NPV, объемы вскрыши и добываемой руды. При необходимости производится несколько расчетов контура карьера с ограничениями по фазам. Довольно часто бывает, что последние фазы несут в себе только затраты, либо очень незначительную прибыль. Таким образом, используя анализ (графики и гистограммы) и ограничения по фазам, выбирается контур карьера для дальнейших исследований.

Программа NPV Scheduler создает этапы делением с небольшой последующей корректировкой оптимальной последовательности извлечения блоков модели месторождения. Она объединяет в этап те блоки последовательности, которые

близки территориально, позволяют удовлетворить ограничения по доступу горной техники и другие введенные пользователем условия.

Для начала работы надо ввести в программу исходные данные:

- число этапов: от 1 до 20. Программа может откорректировать установку, если оптимальный карьер не позволяет иметь столько этапов.
- необходимость совмещения последнего этапа с контуром ранее рассчитанного предельного карьера.
- минимальное расстояние между границами смежных этапов для свободного размещения горной техники.
- минимальное количество блоков в остатке, допустимое между границей последнего этапа и предельным контуром карьера.
- необходимость того, чтобы каждый следующий этап полностью включал в свои границы все предыдущие;
- целесообразность ограничения последнего этапа одним из блоков оптимальной последовательности их извлечения.

Программа позволяет задать еще целый ряд дополнительных параметров, которые производят более точную настройку процесса. В частности можно контролировать взаимное расположение этапов, их форму и последовательность.

После того, как получены предельные границы карьера и этапы его развития, производится детальное проектирование карьера, т.е. создается его 3-х мерная каркасная модель на конец каждого этапа отработки. Затем по этим каркасным поверхностям создается календарный план отработки запасов, выбираются и оптимизируются системы рудопотоков предприятия, а также – его производительность и бортовые содержания основных компонентов.

В результате, кроме таблицы, программа рассчитывает также новую модель карьера, в которой для каждого блока вписаны номера его начального и конечного годов отработки. Программа создает несколько альтернативных планов:

- вариант с максимумом NPV без учета целевых переменных.
- лучшие варианты для каждой целевой переменной.

Если имеется несколько решений, удовлетворяющих требованиям, то на выходе получится набор практически идентичных планов.

В окне визуализатора можно увидеть вид карьера на конец каждого этапа отработки или просмотреть в графическом окне отдельные планы и сечения.

Период планирования может быть какой угодно длительности: неделя, месяц, квартал, год. Но выполняя слишком детальные расчеты, надо учитывать размер блоков используемой экономической модели. Если он очень большой, то невозможно гибко управлять запасами в небольших объемах, т.к. каждая ячейка модели имеет одинаковое качество и экономическую оценку. Для краткосрочного планирования следует работать на специально созданной модели с небольшим размером основного блока.

Пакет NPV Scheduler может использоваться для разных стадий планирования горных работ. Исходная геологическая модель, полученная на основе детальной разведки, подходит для составления календарного плана по годам отработки. Для месячного и недельно-суточного планирования больше подходят модели с блоками малого размера, построенные по объединенным данным детальной и эксплуатационной разведок. Пакет может использоваться и для подземных рудников, где, например, очистные забои могут быть представлены в виде рудных складов.

При необходимости в программу можно ввести реальные этапы отработки карьера в виде поверхностей и далее, минуя стадии оптимизации конечных контуров карьера и создания этапов, сразу перейти к календарному планированию и оптимизации рудопотоков.

6.2.2 GEMCOM WHITTLE

Пакет Gemcom Whittle представляет собой развитие системы Four-X Analyser компании Whittle Programming. Он включает в себя набор средств стратегического планирования горных работ, спроектированный для профессиональных горных инженеров. Имеется расширенный набор модулей, которые могут быть добавлены к основному ядру, еще больше увеличивая его производительность и полезность. Но одновременно и стоимость.

В частности Модуль **Multi-element** расширяет возможности Four-X Analyser, позволяя определять в модели месторождения до десяти различных элементов (содержаний). Этот модуль весьма полезен для анализа рудников по добыче многокомпонентного сырья. Каждый из продуктов может иметь независимую функцию извлечения для одного или более способов переработки. Каждый элемент может иметь различную структуру затрат и ограничений. С помощью модуля Multi-element можно смоделировать и отслеживать также ядовитые или вредные минералы и примеси.

Можно существенно улучшить экономические характеристики выбранного «оптимального» карьера за счет использования поэтапной отработки, т.е. выбора такой последовательности этапов (с использованием максимально возможных углов откоса бортов в каждом из них), которые дадут максимум NPV. Программа включает в себя возможность разделения срока эксплуатации карьера на этапы с учетом оптимальной последовательности их отработки и соблюдения горнотехнических.

Особенности ядра системы

Система спроектирована для интеграции различных модулей, поэтому ее работа, управление данными, файлами справки и целостность организованы на высоком уровне качества. Основанный на последних разработках графического интерфейса (GUI), известного как среда Proteus Environment®, позволяет пользователям быстро и легко импортировать, манипулировать и визуализировать модели запасов, отстраивать откосы карьеров, операционные и экономические модели и оптимизировать оболочки карьеров. Пользователи могут составлять планы развития рудника трех типов, включая планы с прогоном контрольных точек и графическим анализом результатов.

Импорт данных

Система воспринимает данные в формате промышленного стандарта Whittle и блочные модели интегрированного горного пакета Gemcom. Файлы моделей запасов Datamine импортируются вместе с файлом параметров или без него. При завершении импорта выдаются сведения по качеству и тоннажу, что помогает процессу восстановления данных.

Работа с моделями

Система может изменять блочные модели, используя широкий набор операций. Модели можно расширять, урезать, объединять, и разделять. Глобальные изменения можно вносить в данные для элементов и можно использовать сложные уравнения для записи позиционных переменных в модель. Моделирование откосов карьеров. Система предоставляет наиболее полную и гибкую систему моделирования откосов из доступных для оптимизации карьеров. Углы откосов карьеров задаются для всей модели несколькими удобными способами. Можно использовать прямоугольные регионы или, в качестве альтернативы, в любом регионе произвольной формы можно присвоить индивидуальным блокам профили углов откосов. Задается до пятидесяти профилей углов откосов с каждым профилем, включающем до восьми пар параметров «азимут/угол наклона». Затем профили присваиваются различным частям блочной модели, обеспечивая полной гибкостью задания формы региона углов откосов бортов.

Модульность и масштабируемость

Программа поставляется вместе с расширяемой основой, которая позволяет наращивать дополнительные модули путем их легкого подключения. Этот

масштабируемый подход позволяет адаптировать и развивать оптимизатор в соответствии с требованиями индивидуальных пользователей.

Оптимизация

Оптимизация выполняется с помощью хорошо известного алгоритма Lerchs Grossmann в реализации компании Whittle. Функция оптимизации карьеров позволяет:

- Моделировать очень простые или очень сложные откосы карьеров, включая приложение определяемых пользователем “дополнительных дуг” к представлению нерегулярных смежных структур.
- Легкое задание пользователями дорогостоящих блоков. Дорогостоящие блоки используются для представления границ аренды или непереключаемых объектов, таких как обогатительные фабрики, под которыми ведение горных работ невозможно.
- Модели цен, затрат и переработки могут быть настолько просты или сложны, насколько это требуется пользователю. Математические выражения можно использовать для изменения цен и затрат в модели и/или при задании качества, или в ответ на широкий диапазон специальных функций и операторов.

Оптимизация карьеров контролируется рядом определяемых пользователем установок, от которых зависит точность проведения оптимизации. За один проход вырабатывается до 100 оптимальных контуров карьера. Они используются в качестве основы для проектирования карьеров и этапов, определения диапазона чувствительности, риска и анализа “что если”.

Визуализация.

В систему встроена интерактивная 3D визуализация блочных моделей, контуров карьеров, этапов добычи и планов горных работ.

Пользователь устанавливает базовый случай для планирования и анализа, включая затраты, цены, пределы производительности, извлечения и т.п. Проектировщики могут применить те же самые установки, что использовались при оптимизации карьера или изменять их, чтобы применить специальную технику анализа. Широкий набор установок экономического сценария можно со временем изменять, совершенствуя модель.

Анализ и графика

Пользователь выбирает одну из трех различных методик планирования развития горных работ и просматривает графики результатов или экспортирует данные для анализа в электронной таблице. При каждом анализе генерируется всеобъемлющий отчет, отражающий все предположения, установки и детали всех составленных планов эволюции рудника.

Экспорт данных

Большой ряд данных и отчетов может быть экспортирован или распечатан, такие как аудит отчеты по каждой импортируемой модели, блочные модели, планы, контуры карьеров и анализируемые данные.

Задание углов откоса для регионов

Набор углов наклона откосов карьера основывается на геотехнической оценке углов в районах, детализируемых в общем горном пакете. Каждый регион имеет профили откосов, представленные в следующей таблице.

Таблица 6.1. Профили откоса с азимутами и углами наклона

Профиль откоса	Азимут, град.	Угол откоса, град.
1	20	42
	135	43
	260	40
2	20	42

	135	43
	260	40
3	20	42
	135	43
	260	40
4	70	36
	260	34
5	70	40
	260	38
6	90	48
	170	50
	270	46
7	0	46
	180	48

6.2.3 ВХОДНАЯ БЛОЧНАЯ МОДЕЛЬ

Имеется массив параметров, влияющих на переработку, проектирование карьера, финансирование и прочие экономические факторы, которые необходимо принимать во внимание. После обработки первичных геологических данных и интерполяции получена экономическая блочная модель месторождения.

6.2.4 ПРОЕКТ ОТКОСОВ БОРТОВ КАРЬЕРА

Первоначальное исследование устойчивости типов пород было сделано при более пологом откосе бортов карьера на западе, чем на востоке.
Базовый набор углов откосов – Консервативный анализ.

Таблица 6.2 .Базовые углы откосов

Азимут	угол наклона
90	45
270	40

Таблица 6.3 – Оценка горных, обогатительных и капитальных затрат

Расходы (удельные)		
Затраты по Добыче	1.25	на тонну
Затраты по Переработке	2.55	на тонну
Затраты по Продаже С	7.20	на 10 кг
Затраты по Продаже	0.20	на карат
Извлечение С	99%	(оценка)

Таблица 6.4 – Пределы по мощности

Пределы по мощности		
Добыча	10млн.т	в год
Обогащение	2 млн.т	в год
Продажа		Не прилагается

Таблица 6.5– Инвестиции

Инвестиции		
ИНВЕСТОР	250 млн. руб.	Оценка

Дисконтирование
IRR

10%

В год
Неизвестно

Ввод экономических параметров

В тестовом примере для Нюрбинского карьера в программу Gemcom Whittle в диалоговом режиме были введены следующие данные:

Таблица 6.6. Входные экономические параметры для оптимизации

№	Параметр	Значение
1.	Производительность карьера по руде	9000 тыс.т/год
2.	Цена алмазов за 1 карат	1 руб. (условно)
3.	Стоимость сортировки, оценки и реализации продукции	2 руб. (условно)
4.	Коэффициент извлечения при обогащении и сортировке	0.98
5.	Коэффициент извлечения из недр	1.0
6.	Разубоживание руды	1.31%
7.	Себестоимость обогащения (без учёта налогов)	$C_{об}=250$ руб./т
8.	Себестоимость добычных работ (без учёта налогов и транспортировки)	$C_{доб}=50$ руб./т
9.	Себестоимость вскрыши (без учёта налогов и транспортировки)	$C_{в}=120$ руб./ м ³
10.	Себестоимость транспортировки тонны руды	$C_{т}=65$ руб./т
11.	Себестоимость транспортировки кубометра вскрыши	$C_{т}=25$ руб./м ³
12.	Налог на добычу полезных ископаемых	8 %
13.	Арендные платежи на 2004-2015	14 %
14.	Дисконтный процент	15 %

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ШАГОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Далее приводится последовательность шагов, которые необходимо сделать для оптимизации.

1. Загрузить модель и файл параметров из директории проекта. Использовать следующие файлы блочной модели: NURBA.MOD содержит информацию о проекте в виде блочной модели. NURBA.PAR содержит базовые размеры блоков, типы пород и элементов модели.
2. Добавить установки для откосов. И проверить, что углы откосов были правильно установлены в файле параметров. Если они не установлены, то ввести информацию из таблицы.
3. Добавить узел для оболочки карьера. Определить какие расходы были бы приостановлены при остановке добычи, а какие нет. Приостановленные расходы должны быть включены в затраты по времени. Эти расходы должны быть разделены на производительность фабрики обогащения, чтобы получить руб./т, которые прибавляются к фиксированным расходам на тонну, чтобы найти полные удельные расходы на переработку. Ввести затраты на горные работы. Задать информацию о переработке, используя полные расходы на переработку и информацию об извлечении полезного компонента (~98%). Задать цены. Задать параметры оптимизации и проверить какой коэффициент годовой прибыли использовался в файле параметров или в своём собственном диапазоне. Ввести изменения.

4. Добавить к дереву узел сценария и добавить ограничения на выходную мощность, капитальные расходы и дисконтные скидки. Ввести временные расходы и временные затраты, включенные в каждый процесс.
5. Создать покарьерный график (секвенции) добычи.
6. Запустить выполнение всех узлов, чтобы определить наилучший и наихудший график планирования для этого рудника. Выбрать набор параметров, которые позволят создать специальный график, который будет показывать массу руды, породы и NPV. Можно ввести до 6 периодов для выбранного предельного карьера, используя массу руды в качестве ориентира для определения момента соответствия производительности обогащения. Необходимо попытаться отсрочить удаление вскрышных пород на сколько это возможно, используя информацию об NPV для выбора оболочек карьера, максимизирующих доход.
7. Добавить график секвенции и ввести выбранную последовательность. Применить алгоритм Milawa NPV для максимизации прибыли. Определить насколько близко приближение к 'лучшему' значению? Открыть конец отчета и посмотреть дисконтированный доход. Как выглядит секвенция? Задействованы ли полностью обогатительные мощности? Каково использование оборудования? Можно ли улучшить оптимизацию, выбрав другую последовательность этапов?
8. Просмотреть информацию о запасах руды в карьере, которую можно найти в конце отчета вместе с общим сроком отработки и IRR.
9. Определить из отчета сроки возврата инвестиций, когда доход от данной операции станет равным вложенным средствам..
10. Определить соответствует ли транспортная схема мощностям по переработке? Проверить используются ли производственных мощности по извлечению в полной мере. Можете попытаться уменьшить производительность по транспорту и изменить капитальные вложения. Скопируйте существующий сценарий и вставьте новый сценарий из узла с оболочкой карьера. Измените производительность добычи и капиталовложения. Как это повлияет на применение транспорта и IRR?
11. Определить соответствует ли обогатительные мощности требованиям проекта? Может ли быть обеспечен рост производственной мощности? Скопировать существующий сценарий и вставить новый сценарий из узла оболочки карьера. Увеличение мощности по переработке приведет к изменению временных затрат в руб/т. Пересчитать новые расходы на переработку. Изменить пределы мощности переработки и капиталовложения. Как это отразится на производственной мощности и использование транспорта, NPV и IRR? Имеется ли ограничение на рост производственных мощностей?

После выполнения данного анализа на печать выводится отчет по проекту.

На основе технико-экономических показателей был рассчитан оптимальный конечный контур карьера месторождения трубка «Нюрбинская». Для расчетов применялась геолого-математическая модель с подсчетом запасов категории В, С1 и С2. Оптимизированный карьер, рассчитанный с использованием программы Gemcom Whittle по максимуму прибыли, имеет в одном из вариантов предельную глубину отработки 390м. По полученному конечному контуру карьера могут быть определены основные экономические и финансовые показатели, повышающие эффективность отработки месторождения.

6.2.5 ПРОГРАММЫ MINEMAX

MineMAX является софтверной и консультационной компанией, обслуживающей горнодобывающую промышленность технологиями оптимизации и планирования горных работ. Технологии MineMAX применялись в международных горных проектах в

широком диапазоне горно-добычных операций. Ниже приводится краткое описание основных оптимизационных программ компании MineMAX.

MineMAX Scheduler

MineMAX Scheduler является мощным компьютерным инструментом планирования горных работ, использующим передовую технологию оптимизации, предназначенной для помощи горнорудным компаниям в оптимизации их рудников по критерию чистой приведенной стоимости, Net Present Value. Эта программа позволяет принять в расчет ограничения на шихтовку руды и промежуточные склады, и дает моментальный отклик в виде практически составленного графика добычи на основе технологии 3-D визуализации. MineMAX Scheduler используется как для среднесрочного и долгосрочного стратегического планирования, так и для оперативного планирования ведения горных работ.

iGantt

iGantt - программное обеспечение планирования добычи на основе экономических показателей, отображает для установленных экономических показателей график добычи, полученный в результате дружественного взаимодействия пользователя с диаграммой Ганта. В соответствии с имеющимися пунктами, может быть определено любое число атрибутов, включая количество, качество, расходы и доходы. Конъюнктурные показатели могут отражать поведение любого из заданных атрибутов и могут быть связаны друг с другом посредством временных последовательностей. Формируемые пользователем отчеты позволяют отслеживать ключевые контрольные показатели производства продукции либо в виде цифровых значений, либо в форме графиков.

iGantt может сохранять графики добычи в ASCII файле или в базе данных. База данных добавляет функциональность программе, позволяя нескольким пользователям одновременно просматривать и работать с любым из графиков планирования. Это дает возможность сотрудникам горного предприятия на всех уровнях организации обеспечить доступ к самому последнему плану добычи.

Дополнительный модуль оптимизации позволяет пользователю задать сценарий, для которого может быть сгенерировано оптимальное решение. Сценарий учитывает ограничения и финансовые показатели для определяемых пользователем периодов времени. Для таких параметров как расстояние проходки, масса руды, общая масса породы или для любого другого параметра модели могут быть легко заданы верхний и нижний пределы значений. Параметры могут быть определены просто как компоненты отчета, в виде ограничений или совместно.

MineMAX Planner

MineMAX Planner – объединяет технологию оптимизации на основе алгоритма Лерча-Гроссмана с интерактивной 3-D визуализацией, обеспечивая горного инженера дружественным инструментарием быстрого определения оптимальных карьеров и выполнения анализа стратегии добычных работ. MineMAX Planner как и другие оптимизаторы представляет запасы минерального сырья в виде блочной модели, содержащей блоки или части блоков (парсели) и связанные с ними атрибуты. С помощью программы Planner можно легко настроить параметры блочной модели, считывая ее напрямую из данных Surpac (mdl), Datamine (dm) или 4X (mod,par).

Для задания финансовой информации, используемой в управлении процессом оптимизации, в этой программе просто вводятся цены на металл, затраты на добычу и обогащение. Устанавливаются местные специальные расходы на добычу, затраты на достижение заданного качества продукта обогащения, что позволяет исследовать чувствительность предельного карьера к изменениям цен на металл при вычислении серии вложенных карьеров. При 3D визуализации имеется возможность кодировать блоки различным цветом в соответствии с той оболочкой карьера, в которой они появляются. Данный анализ также полезен на стадии разработки или при многократно повторяющемся планировании.

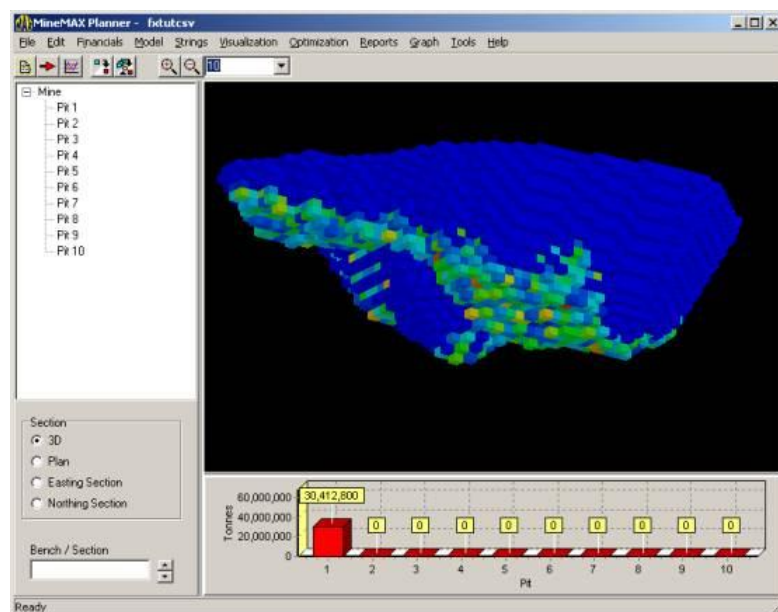


Рис. 6.1. Вид блочной модели для предельного карьера

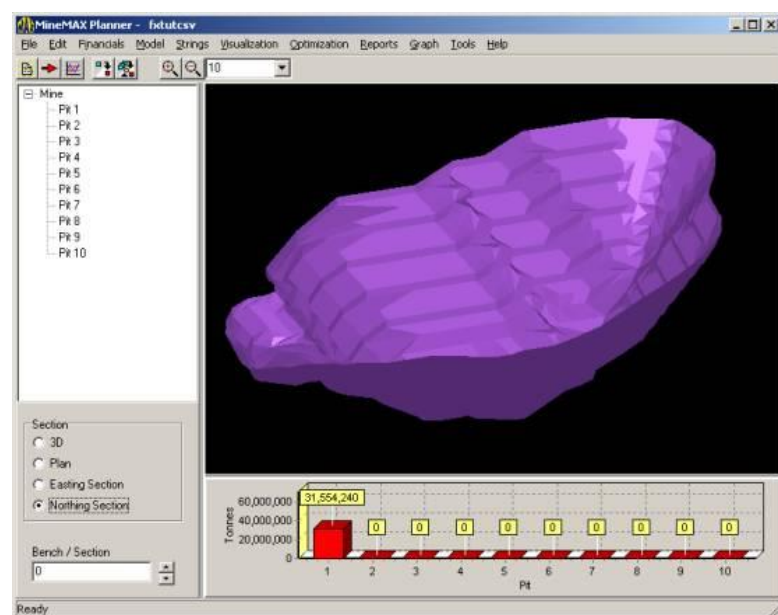


Рис. 6.2. Извлеченная оболочка предельного карьера

Окончательные этапы оптимальной отработки месторождения представлены на Рис. 6.3.

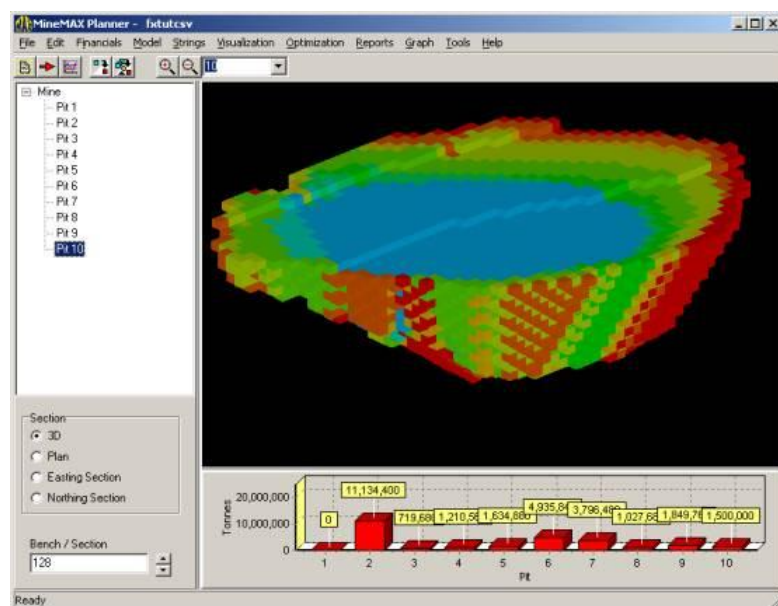


Рис. 6.3. Этапы или фазы оптимальной отработки месторождения

Таким образом, программа MineMax Planner позволяет выполнять оптимизацию контуров карьеров по упрощенной методике с предоставлением отчетов в виде гистограмм и текстового описания.

6.3 СОПОСТАВЛЕНИЕ РАБОТЫ ОПТИМИЗАТОРОВ

Для проведения сравнительных испытаний использовалась блочная модель месторождения трубки Нюрбинская, построенная с использованием компьютерной системы Datamine. Для NPV Scheduler этот формат является стандартным, для программ Gemcom Whittle и MineMaxPlanner использовались утилиты преобразования блочной модели *.DM в соответствующий формат экономических моделей оптимизаторов, *.MOD (Whittle) и *.BBL (MineMax).

Для каждой программы выбирались одинаковые ограничения и экономические факторы.

Результаты сравнения работы программы NPV Scheduler, Gemcom Whittle (Four-X Analyser) и MineMax Planner показывают, что получаемая NPV(чистый дисконтированный доход – ЧДД) у первой программы в среднем на 3% ниже, чем у результатов получаемых по алгоритму Whittle Milawa и при работе программы MineMax Planner, однако это различие незначительно. По вспомогательным параметрам имеется несущественное отличие работы NPVs с Four-X Analyser и MineMax.

Пользовательский интерфейс Four-X Proteus Environment имеет вид дерева решений, поэтому по своим возможностям и удобству более предпочтителен, чем традиционный Windows интерфейс программы NPV Scheduler. Gemcom Whittle позволяет выполнять древовидные сценарии и создавать аналитическую документацию таким образом, что пользователи могут строить свои собственные модели анализа подходящим для них образом. Whittle позволяет создавать множественные планы развития рудника за один цикл расчетов для целей сравнения и анализа. Это более предпочтительная система для всех типов анализа риска капиталовложений. NPV Scheduler имеет однопроходную схему последовательности операций.

И NPV Scheduler и Gemcom Whittle имеют гибкую систему моделирования углов откоса бортов карьера и учета стоимости, однако функции переблокировки блочных моделей в Whittle более широкие.

В системах NPV Scheduler и Gemcom Whittle реализованы практически аналогичные методики моделирования расходов и цен, извлечений и т.д. при наличии большого числа различных способов выделения разных типов руд. По разному решен вопрос диалога с пользователем. Однако в Gemcom Whittle встроен алгоритм Milawa, позволяющий выполнять поиск максимума чистой прибыли (NPV) или максимума использования стоимости запасов с заданными ограничениями по каждому этапу добычи: (а) по максимальному вертикальному подвиганию, углубке, за выбранный период времени, (b) по максимальной величине заходки на следующий этап, (с) по минимальной величине заходки на следующий этап добычи и т.д.. Как и большинство других параметров при анализе в Gemcom Whittle, опции алгоритма Milawa могут быть изменены для каждого периода времени добычи.

Имеется также ручной способ планирования, который полезен для быстрой оценки различных параметров этапов добычи. Учет ширины площадок в системе NPV Scheduler является более упрощенным по сравнению с Gemcom Whittle для нижних горизонтов горной выработки. Наконец, Gemcom Whittle позволяет создавать множественные сценарии перспективных планов, когда по запросу пользователей цикл жизнедеятельности рудника может быть спланирован за один проход. Например, можно запросить Gemcom Whittle создать оптимальные планы для таблицы различных цен на продукцию и удельных производственных расходов. При этом можно рассмотреть множество различных случаев, а затем выбрать любой из буквально сотен различных параметров и вывести результаты на график.

Важным условием применения оптимизаторов является возможность интеграции с пакетами горно-геологического моделирования. Первая программа, Whittle Four-X Analyser, тесно взаимосвязана с интегрированным пакетом моделирования Gemcom, однако имеет также все необходимые средства экспорта и импорта данных в системы Vulcan (Maptec), Surpac, Minescape и Mincromine. Вторая программа, Earthworks NPV Scheduler, предназначена в основном для работы с Datamine, но также имеет в своем составе набор драйверов для экспорта и импорта данных в наиболее известные системы геологического моделирования месторождений. Наконец, третья программа, MineMax Planner не имеет жесткой связи с каким-либо общим горным пакетом и может работать с исходными данными от таких программ как Micromine, Surpac, Vulcan и в том числе Datamine. Подобная интеграция позволяет выполнять текущее планирование горных работ при открытых и подземных в тесной взаимосвязи с работой больших систем горно-геологического моделирования месторождений для выполнения проектирования и планирования добычи минерального сырья.

6.3.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТУРОВ КАРЬЕРА.

В первую очередь выполняются все операции, связанные с созданием модели месторождения и оценкой его запасов. Модель может базироваться на любом объеме геологической информации, характерной для той или иной стадии геолого-оценочных расчетов. На ранних стадиях разведки модель обычно состоит из достаточно крупных блоков. На стадии детальной и эксплуатационной разведки она может быть разбита на очень мелкие блоки и субблоки с детальной характеристикой содержащейся в них руды.

Математическая модель месторождения создается с целью получения возможности инженером-технологом при оперативном планировании или проектировании определять характеристики горной массы в любой точке пространства и в любом объеме. Математические модели отличаются между собой характером представления информации, что ведет к различиям по полноте и детальности моделей. Большое значение при создании математической модели месторождения имеет способ, которым она строилась. Сегодня представляется целесообразным представление математической

модели месторождения в виде трехмерного массива с определением значения показателя качества по тому или иному признаку в каждой ячейке массива. Представление математической модели месторождения в виде контуров, объединённых в погоризонтные планы, представляется нецелесообразным, поскольку значительно увеличивает сложность использования такого рода модели, что значительно сокращает область ее применения.

Для работы необходимо иметь возможность построения блочной математической модели месторождения по любому имеющемуся признаку и зонирования месторождения по совокупности любых признаков.

Основные исходные данные, необходимые для получения надёжной оптимизации карьеров представляют собой:

- Блочная модель Datamine с обязательными полями: объёмный вес, г/см³ и содержание п.к., кар./т. или данные для построения этой модели;
- Топография поверхности (файл периметров) в формате Datamine;
- Контурные рудного тела (файл периметров) в формате Datamine;
- Производительность карьера по руде: тыс.т/год;
- Производительность фабрики: тыс.т/год;
- Цена алмазов за 1 карат: (руб.), долл. США;
- Курс доллара по плану производственно-хозяйственной деятельности;
- Стоимость сортировки, оценки и реализации продукции: (руб.), долл. США, в % от выручки;
- Расходы на управление: (руб.), долл. США, в % от выручки;
- Коэффициент извлечения при обогащении и сортировке (потери): %;
- Коэффициент извлечения из недр (потери): %;
- Разубоживание: %;
- Себестоимость добычных работ (без учёта налогов и транспортировки): руб./т.;
- Себестоимость вскрыши (без учёта налогов и транспортировки): руб./т.;
- Себестоимость транспортирования (без учёта налогов): руб./т.;
- Себестоимость обогащения (без учёта налогов): руб./т.;
- Общерудничные расходы: руб./карат;
- Геолого-разведочные работы: руб./карат;
- Налоги, включаемые в себестоимость продукции:
 - плата за пользование недрами: %;
 - платежи на воспроизводство минерально-сырьевой базы: %;
 - арендные платежи: % от выручки (в т.ч. числе ставка НДС по арендной плате);
 - прочие налоги: (дорожный налог, налог на имущество), %;
- Дисконтный процент: %;
- Налог на прибыль: %;
- Инвестиционные расходы всего: руб.;
- Сумма капитальных вложений: руб.;
- Амортизация: руб.;
- Перечень основных фондов.

6.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНЫХ КОНТУРОВ КАРЬЕРОВ

Наиболее известными в настоящее время методами решения задачи определения оптимальных контуров карьеров являются: метод Лерчса-Гроссмана и метод плавающего конуса. За рубежом метод Лерчса-Гроссмана является фактически промышленным стандартом. Применение этого метода дает определение самого оптимального конечного контура карьера с экономической точки зрения. Экономическая

оптимальность определяется на основе экономической модели месторождения. Метод Лерчса-Гроссмана хорошо решает задачу определения оптимальных конечных контуров карьера, когда прибавочная стоимость формируется на этапе выхода конечной продукции карьера - руды за пределы контура карьера. В принципе - это метод оптимизации конечных контуров карьера, предусматривающих применение процедур трехмерного динамического программирования для определения границ месторождения при разработке открытым способом по определенному пользователем критерию. Динамический подход выражается в том, что в затратах на извлечение конкретного блока учитываются затраты на блоки, которые необходимо будет для этого удалить из карьера.

Метод Лерчса-Гроссмана выдает на основе построенной экономической модели месторождения, оптимальный вариант конечного контура карьера

6.4.1 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА КАРЬЕРА ТРУБКИ «НЮРБИНСКАЯ»

Относительно благоприятные горно-геологические условия залегания оцениваемых месторождений, наличие большого опыта эксплуатации аналогичных месторождений открытыми горными работами, возможность с относительно низкими инвестициями начать добычные работы, определяют целесообразность открытого способа разработки трубки "Нюрбинская".

Одним из важных факторов, влияющих на определение оптимальных параметров карьера являются не только затраты на единицу добываемого полезного ископаемого, но и общий доход или прибыль, полученная от реализации всего объема добытой руды. В настоящее время применение компьютерных технологий позволяет учесть максимальное количество факторов, в конечном счете, имеющих непосредственное влияние на определение конечной глубины отработки. Существующие технологии позволяют провести исследования и в процессе динамики, то есть с учетом изменения технико-экономических параметров во времени или в процессе отработки месторождения.

Методика исследований была основана на применении геолого-математических моделей кимберлитового месторождения, построенных по распределению общего содержания алмазов, а также по результатам геометризации рудного тела, вмещающих и перекрывающих горных пород, выполненной по отчетным данным с использованием планов, геологических разрезов и данных бурения геологоразведочных скважин.

Исследования по определению конечного контура карьера проводились с использованием геолого-математической и экономической модели, включающей в себя все основные технико-экономические показатели алмазодобывающего предприятия. Конечный контур карьера определялся методом Лерчса-Гроссмана по критерию максимальной прибыли. Для расчета финансово-экономических показателей использовался оптимизированный контур карьера. После оптимизации полученный контур карьера был доработан, то есть, проведены дополнительные работы по проектированию карьера с учётом всех технологических показателей (схема вскрытия, ширина транспортных и предохранительных берм, продольный уклон основного съезда, высота и угол откоса уступа и т.п.).

Нижняя граница проектируемого карьера определялась минимально возможными, с технологической точки зрения, размерами дна карьера. Для определения минимальных размеров дна карьера использовались основные параметры выемочно-погрузочного оборудования и автотранспорта, применяемого на месторождении. Минимальные размеры дна карьера с учетом допустимых погрешностей и технологических схем отработки месторождения приняты 65х100м.

Проведенные исследования по выбору оптимального контура карьера с учетом дальнейшей совместной отработки месторождения с тр. Ботубинская показали, что

наиболее экономически выгодный с точки зрения чистого дисконтированного дохода является карьер с глубиной отработки (-55м). На Рис. 6.4 представлена гистограмма чистого дисконтированного дохода для различных вариантов глубины отработки.

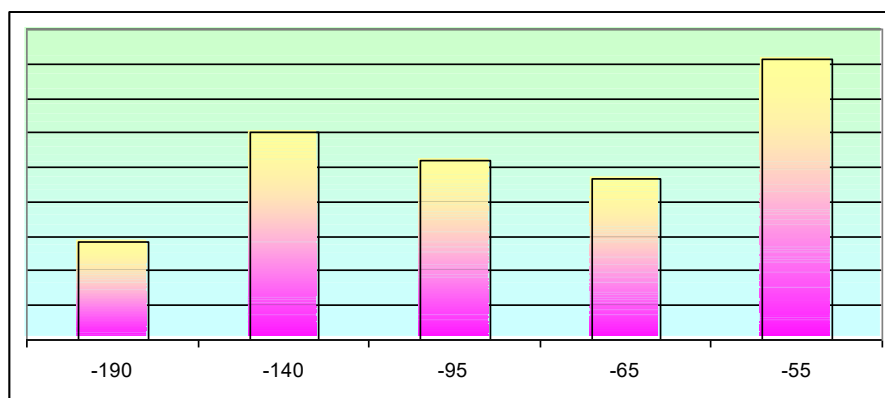


Рис. 6.4.. Гистограмма чистого дисконтированного дохода для различных вариантов глубины отработки трубки Нюрбинская с учетом совместной отработки трубки Ботуобинская.

Как видно из представленной гистограммы, оптимальная глубина отработки месторождения соответствует абсолютной отметке (-55м). Необходимо отметить, что в настоящее время обозначен прирост запасов тр. Ботуобинская. Дополнительно был рассмотрен вариант самостоятельной отработки месторождения трубка «Нюрбинская», определение перспективного контура и глубины в соответствии с критерием максимальной прибыли. При использовании компьютерных технологий одним из факторов, определения конечной глубины карьера являлась величина чистой прибыли.

Произведено сравнение трёх вариантов по отработке балансовых запасов руды трубки «Нюрбинская», для расчёта их экономической эффективности (чистого дохода, чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности), рентабельности и себестоимости для всех вариантов, с получением чистой прибыли (с учётом всех затрат и налогов) по каждому варианту. Для трубки «Нюрбинская»: Первый вариант предполагает отработку до глубины 305м (абс.отм.–55м), второй вариант до глубины 390м (абс.отм.-110м) и третий вариант предполагает период отработки месторождения открытым способом до глубины карьера 440 м (абс.отм.-140м).

Расчёты по всем вариантам производились с помощью компьютерных технологий, при использовании проектного контура карьера полученного в системе Datamine. По всем вариантам, на основе технико-экономических показателей произведена оптимизация карьера и определен конечный контур с последующим расчетом эффективности отработки месторождения в пределах заданного контура.

В основу экономической оценки рассматриваемых вариантов и выбора оптимальной схемы организации производства положены общие методологические положения оценки эффективности инвестиционных проектов.

В качестве основных показателей, используемых для расчетов эффективности инвестиционных проектов, рекомендованы:

- ✓ чистый доход (ЧД);
- ✓ ставка (норма) дисконтирования (Е);
- ✓ чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- ✓ внутренняя норма рентабельности (ВНД).

Финансовые расчеты осуществлены, исходя из условий, что финансирование проекта будет осуществляться без привлечения внешних источников. Использование этого алгоритма позволяет определить оптимальный конечный контур карьера с

экономической точки зрения. Оптимальность определяется на основе экономической модели месторождения. Результатом расчетов является конечный контур карьера, обеспечивающий максимальную дисконтированную прибыль за весь период отработки месторождения.

Оптимизация карьера выполняется по выбранному пользователем критерию (обычно максимум прибыли). Параллельно рассматриваются все этапы развития карьера, и оптимизируется последовательность вскрытия и отработки горизонтов.

Для расчетов используются следующие данные:

- Содержание алмазов для каждого геологического блока;
- Данные по зонированию горных пород (вмещающие породы, рудное тело);
- Значение плотности и объем горной массы для каждой элементарной ячейки;
- Контуры рудного тела, топографическую поверхность и проектный контур карьера.

Для определения оптимального конечного контура карьера были включены технико-экономические параметры:

- Производительность карьера по руде;
- Цена алмазов за 1 карат;
- Стоимость сортировки, оценки и реализации продукции;
- Коэффициент извлечения при обогащении и сортировке (для руды);
- Коэффициент извлечения при обогащении и сортировке (для песков);
- Себестоимость обогащения (без учёта налогов);
- Себестоимость добычных работ (без учёта налогов и транспортировки);
- Себестоимость вскрыши (без учёта налогов и транспортировки);
- Себестоимость транспортирования одной тонны руды;
- Себестоимость транспортирования одного кубометра вскрыши;
- Общерудничные расходы;
- Налоги, включаемые в себестоимость продукции:
- налог на добычу полезных ископаемых;
- арендная плата (от товарной продукции);
- Налог на прибыль в размере;
- Дисконтный процент;

На основе технико-экономических показателей был рассчитан оптимальный конечный контур карьера месторождения трубки «Нюрбинская». Для расчетов применялась геолого-математическая модель с подсчетом запасов категории C_1 и C_2 . Содержание по геологическому блоку C_2 определено по данным геологического опробования. Оптимизированный карьер имеет предельную глубину отработки 390м. Для полноты выемки рудного тела до абсолютной отметки -140м, нижняя граница оптимизированного карьера была отредактирована с учетом технологических параметров. По полученному конечному контуру карьера были определены основные экономические и финансовые показатели, определяющие эффективность отработки месторождения.

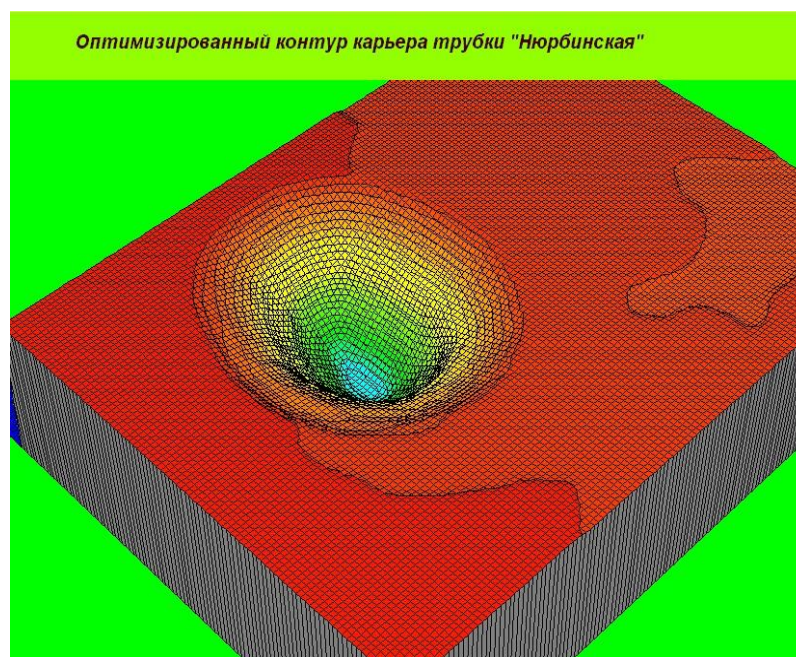


Рис. 6.5. Оптимизированный контур карьера трубки «Нюрбинская»

6.4.2 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА КАРЬЕРА ТРУБКИ «ЗАРНИЦА»

Месторождение трубки «Зарница» характеризуется отсутствием перекрывающих пород, большими линейными размерами поперечного сечения рудного тела, отсутствием в верхней части месторождения подземных вод.

Эти особенности позволяют реализовать максимально эффективный порядок отработки месторождения. Учитывая, что диаметр рудного тела по поверхности составляет около 0,5 км, представляется возможность формирования контура карьера непосредственно в рудном теле (метод карьер в руде), практически без выполнения вскрышных работ, что с учетом относительно небольшой производительности карьера по добыче руды позволяет отрабатывать месторождение в течение достаточно продолжительного времени. Работа без производства вскрышных работ позволяет обойтись минимальным количеством горно-транспортного оборудования на карьере «Зарница».

Основными типовыми (классическими) экономическими показателями и понятиями, используемыми при оценке месторождения и определения балансовой принадлежности его запасов являются:

- ДП - денежный поток;
- ЧДД - чистый дисконтированный доход;
- ВНД - показатель внутренней нормы рентабельности;
- расчетный срок окупаемости инвестиций.

Денежный поток – движение наличных средств, будущих реальных денежных поступлений (приток) и расходов (отток) при эксплуатации месторождения, иллюстрирующие финансовые результаты от возможной реализации проекта. При расчете денежного потока приведение разновременных затрат и доходов к начальному периоду оценки осуществляется с использованием процедуры дисконтирования.

Чистый дисконтированный доход определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

Если ЧДД инвестиционного проекта положителен, проект является эффективным (при данной норме дисконта) и может рассматриваться вопрос о его принятии. Чем больше ЧДД, тем эффективнее проект. Если инвестиционный проект будет осуществляться при отрицательном ЧДД, инвестор понесет убытки, т.е. проект неэффективен.

Срок окупаемости – временный минимальный интервал (от начала осуществления проекта), за пределами которого интервальный эффект становится и в дальнейшем остается неотрицательным. Иными словами, это – период (измеряется в годах), начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты, связанные с инвестиционным проектом, покрываются суммарными результатами его осуществления. Результаты представлены с использованием блочной модели с уточненным распределением содержаний алмазов в пространстве рудного тела и сформированы с применением программы Datamine. Для расчета и применения оптимизационных методов были созданы две модели месторождения – модель с равномерным содержанием алмазов, соответствующая данным подсчета запасов и модель, рассчитанная методом кригинг (Рис. 6.6)

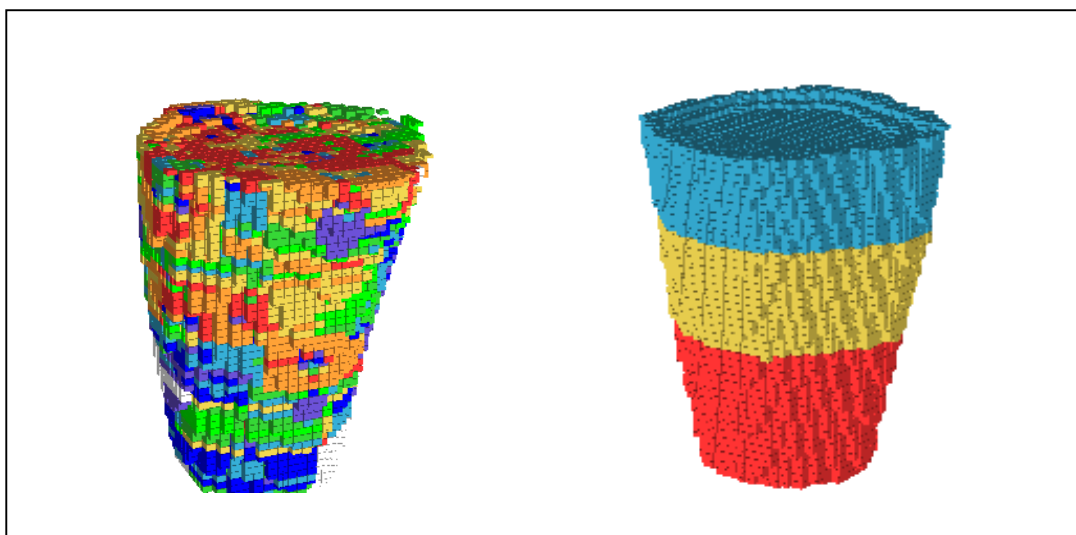


Рис. 6.6. Модели распределения содержаний алмазов (слева – методом кригинг, справа – модель, соответствующая содержанию алмазов ГКЗ).

Оптимизация производилась с учетом, что все запасы в контуре карьера (блок 1-С1) считать балансовыми, был получен оптимальный конечный контур карьера до абсолютной отметки +250м (170 метров). В перспективе, с учетом доразведки месторождения и оценки запасов, с переводом руды блока 2-С2 в категорию забалансовых руд, границы карьера могут быть увеличены с вовлечением дополнительных запасов руды блока 2-С2.

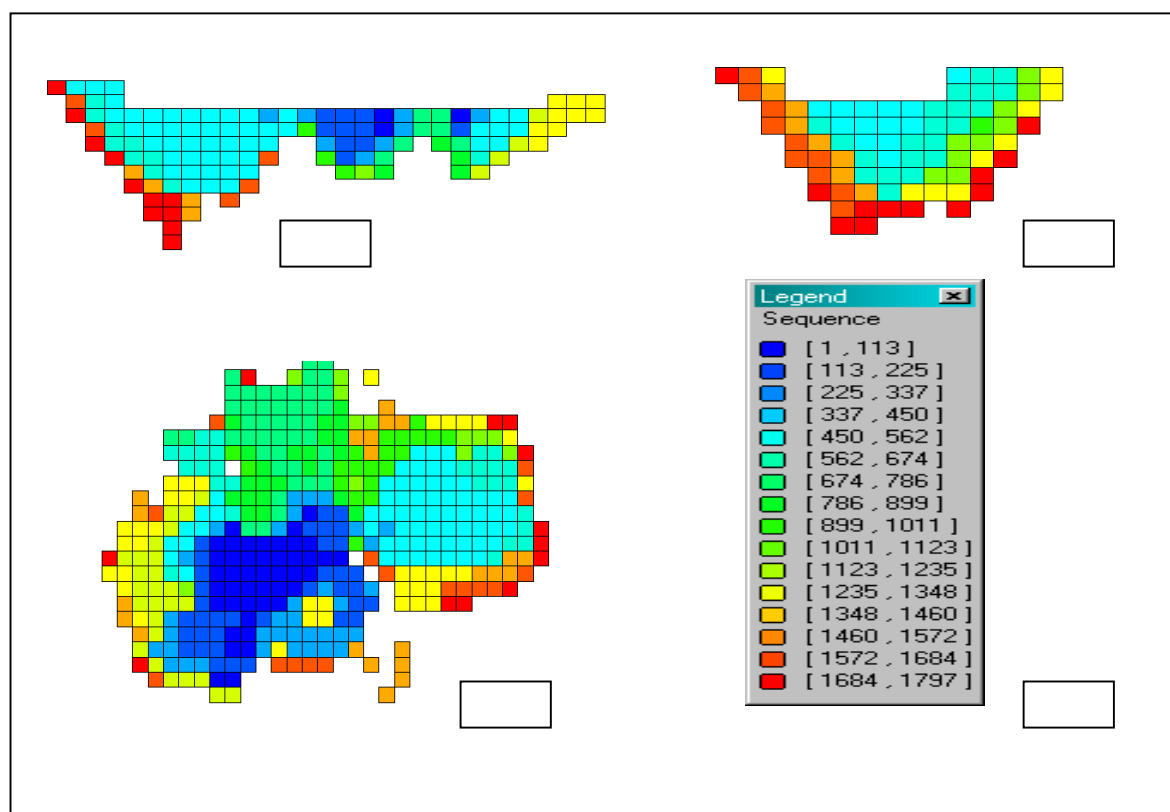


Рис. 6.7. Модель оптимизационного карьера по сечениям. А – север-юг; Б-восток-запад; В – план; Г- стоимость с учетом затрат на добычу и извлечение элементарного блока.

Любой конечный контур имеет стоимостную оценку, поэтому если известен характер залегания рудного тела и вмещающих горных пород, то предстоящие эксплуатационные затраты связанные с добычей и переработкой руды, а также цены на конечную продукцию, позволяют реально получить общую экономическую оценку для данного контура с учётом дисконтирования предстоящих затрат во времени. При такой оценке каждый блок должен быть оценен в предположении, что он уже вскрыт и будет извлечён, руда из него будет переработана, а порода - вывезена в отвал. Кроме очевидных, возрастающих с глубиной затрат, в эту статью должны быть включены все накладные расходы.

Каждый рудный блок, таким образом, будет характеризоваться ценой полученной из него готовой продукции и затратами на его добычу и переработку. При этом цена готового продукта, как правило, связана с качеством полезного ископаемого, то есть содержанием в нем полезного компонента.

При оптимизации создаётся такая последовательность включения в контуры карьера породных и рудных блоков, чтобы исключить вовлечение в отработку тех блоков руды и попутно добываемых блоков породы, чей вклад в прибыль отрицателен. Программа берёт из геологической модели:

- Расчетное по результатам опробования содержание алмазов для каждой прямоугольной ячейки, из которых состоит модель;
- Данные по зонированию горных пород (вмещающие породы, рудное тело);
- Значение плотности и объем горной массы для каждой элементарной ячейки;
- Контуры рудного тела, топографическую поверхность и проектный контур карьера.

Оптимизация обычно не может дать однозначного ответа и должна всякий раз пересчитываться в случае существенного изменения какого-либо из определяющих параметров, например, при резких колебаниях рыночной стоимости цен на алмазы.

На выходе программ оптимизации для каждого «вложенного» карьера обычно рассчитываются:

- экономическое бортовое содержание для полезного компонента
- поток денежных средств (CashFlow), \$
- количество горной массы в контуре карьера, т;
- количество разных типов руд с учетом разубоживания, потерь и бортового содержания, т;
- количество извлекаемого полезного компонента после переработки руды
- оценка NPV, \$
- время работы карьера, лет.

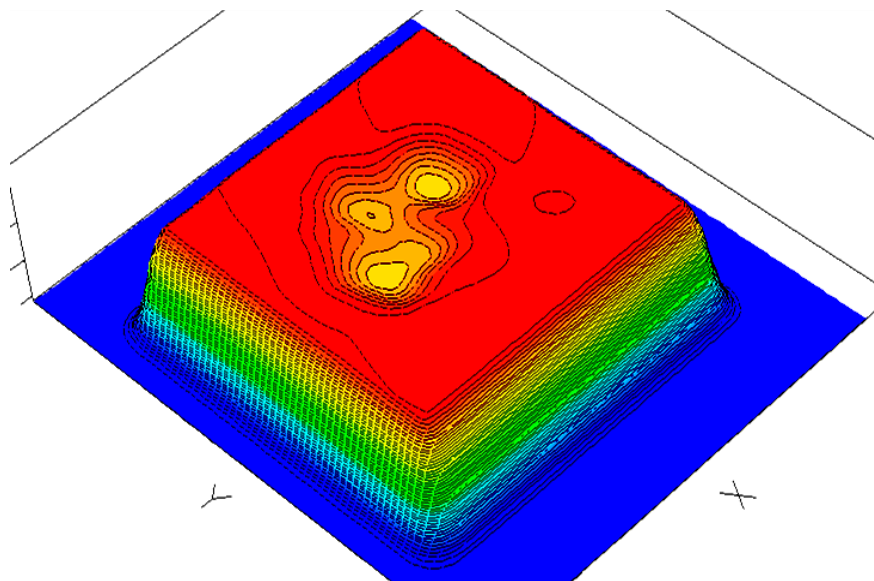


Рис. 6.8. Оптимизированный контур карьера трубки «Зарница»

6.4.3 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА КАРЬЕРА ТРУБКИ «ЗАПОЛЯРНАЯ»

Трубка «Заполярная» расположена в Верхне - Мунском районе. Рудное тело имеет вытянутую с северо-запада на юго-восток форму. Размеры верхней части трубки по короткой оси 122-198м., по длинной оси 446м. До изученной глубины трубка сложена автолитовой кимберлитовой брекчией (АБК) в центральной части и порфировыми кимберлитами (ПК) в северо-западной и юго-восточной частях. Возраст кимберлита - палеозойский (D3-C1).

Вмещающие породы представлены отложениями кембрийского возраста. Среднекембрийские отложения силигирской свиты (ϵ_{2SL1}) залегают на менее изученных раннекембрийских (ϵ_1) и представлены известняками, доломитистыми, алевролитистыми, глинистыми известняками, плоскогалечными известняковыми конгломератами. Верхнекембрийские отложения залегают с угловым несогласием непосредственно на среднекембрийские и представлены двумя свитами. Чукукская свита ($\epsilon_{3СК}$) сложена известняками, оолитовыми, кальцитизированными, доломитистыми известняками, в основании – известковые гравелиты. Мархинская свита ($\epsilon_{3МРН}$) представлена глинистыми, алевролитистыми, доломитистыми известняками, известковистыми доломитами. Четвертичные элювиальные отложения (Q_4) перекрывают рудное тело мощностью 1-2 м.

Геолого-математическая модель месторождения создавалась по данным контуров (периметров) рудного тела и выделенным геологическим блокам. Каркасная и блочная

модели трубки «Заполярная» представлены Рис. 6.9. Исходные данные для расчета пространственных содержаний алмазов представлены данными кернового и валового опробования.

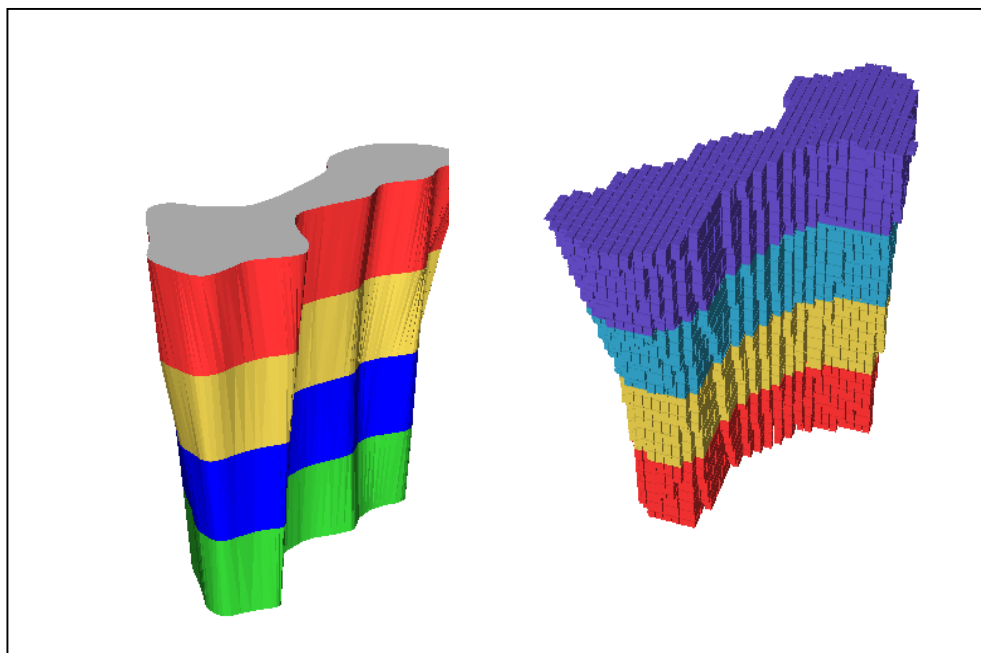


Рис. 6.9. Каркасная и блочная модели трубки «Заполярная»
 (различным цветом выделены геологические блоки)

Геолого-математическая модель месторождения создавалась с применением математических методов обработки и геостатистического анализа исходной информации. Расчеты проводились с учетом выделенных разновидностей кимберлитов.

При расчетах пространственного распределения содержаний алмазов использовалась блочная модель с размерами ячеек 20х20х15 с делением на более мелкие ячейки для более точного описания морфологии рудного тела и геологических блоков, представленная на Рис. 6.10.

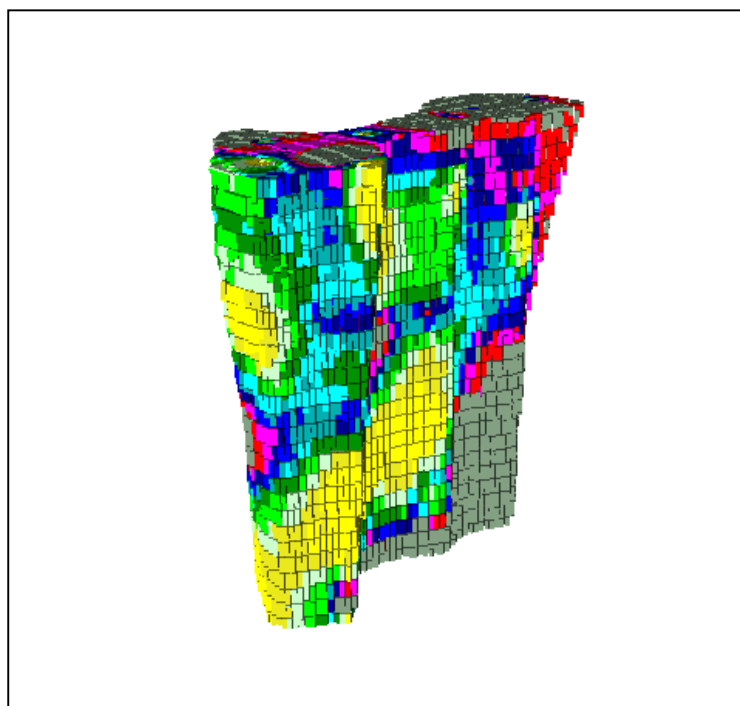


Рис. 6.10. Модель распределения содержания алмазов трубки «Заполярная»

Создание экономической модели месторождения трубки «Заполярная»

Все оптимизационные расчеты проводились на блочной модели месторождения, которая импортировалась в оптимизатор из базы данных системы «Датамайн».

Программа, используя исходные данные, рассчитывает для каждой ячейки модели дополнительную экономическую характеристику. Это – величина чистой прибыли, которую получит предприятие, если оно добудет руду данного блока, переработает ее и продаст все извлеченные полезные компоненты по установленным ценам на рынке. Затраты на вскрышные работы здесь пока не учитываются.

Оценка блока может быть как положительной, так и отрицательной (пустые и вмещающие породы, бедные руды). Далее по блочной модели оцениваются все запасы с содержанием выше бортового (руда) и количество пустой породы. Эта модель будет использоваться во всех процессах оптимизации. Программным обеспечением производится расчет экономической модели, представленной ниже (в сокращенном виде, поскольку дается дополнительная информация о блочной модели, статистика блоков, координаты и размеры).

Отчет о создании экономической модели и ее основные параметры

Основные единицы

- Валюта: руб.
- Единица массы: тонна

Общая информация

- стоимость добычи руб./т.
- разубоживание
- извлечение

Информация о продукте:

- единица: карат
- стоимость 1 карата.
- Бортовое содержание для типов руды (геологических блоков)

- Общий тоннаж руды

Проведение расчетов

На второй стадии оптимизации карьера осуществлялось разбиение всего срока его отработки на этапы. Основная разница между фазами или «вложенными» оболочками карьера и этапами заключается в том, что фаза это условная, а не реальная стадия развития карьера, какой является этап. Фазы создаются без всякого учета горных ограничений, могут размещаться в разных местах месторождения, иметь различные размеры, нереальные границы. Они создаются просто как набор оптимальных карьеров, которые получаются при изменении цены за карат. В свою очередь, этапы отображают реальную последовательность отработки запасов и следуют всем введенным ограничениям и условиям, например – наилучшему качеству руды.

Отстраиваются этапы делением с небольшой последующей корректировкой оптимальной последовательности извлечения блоков модели месторождения. Она объединяет в этап те блоки последовательности, которые близки территориально, позволяют удовлетворить ограничения по доступу горной техники и другие введенные пользователем условия.

После того, как получены предельные границы карьера и этапы его развития, производится детальное проектирование карьера, т.е. создается его 3-х мерная каркасная модель на конец каждого этапа отработки. Затем по этим каркасным поверхностям создается календарный план отработки запасов, выбираются и оптимизируются системы рудопотоков предприятия, а также – его производительность и бортовые содержания основных компонентов.

В результате, кроме таблицы, программа рассчитывает также новую модель карьера, в которой для каждого блока вписаны номера его начального и конечного годов отработки. Программа создает несколько альтернативных планов:

- вариант с максимумом NPV без учета целевых переменных;
- лучшие варианты для каждой целевой переменной.

Если имеется несколько решений, удовлетворяющих требованиям, то на выходе получится набор практически идентичных планов.

Результатом расчетов является определение конечной глубины карьера и его контуров с точки зрения максимума NPV (чистого дисконтированного дохода). Оптимизированный контур карьера представлен на Рис. 6.11.

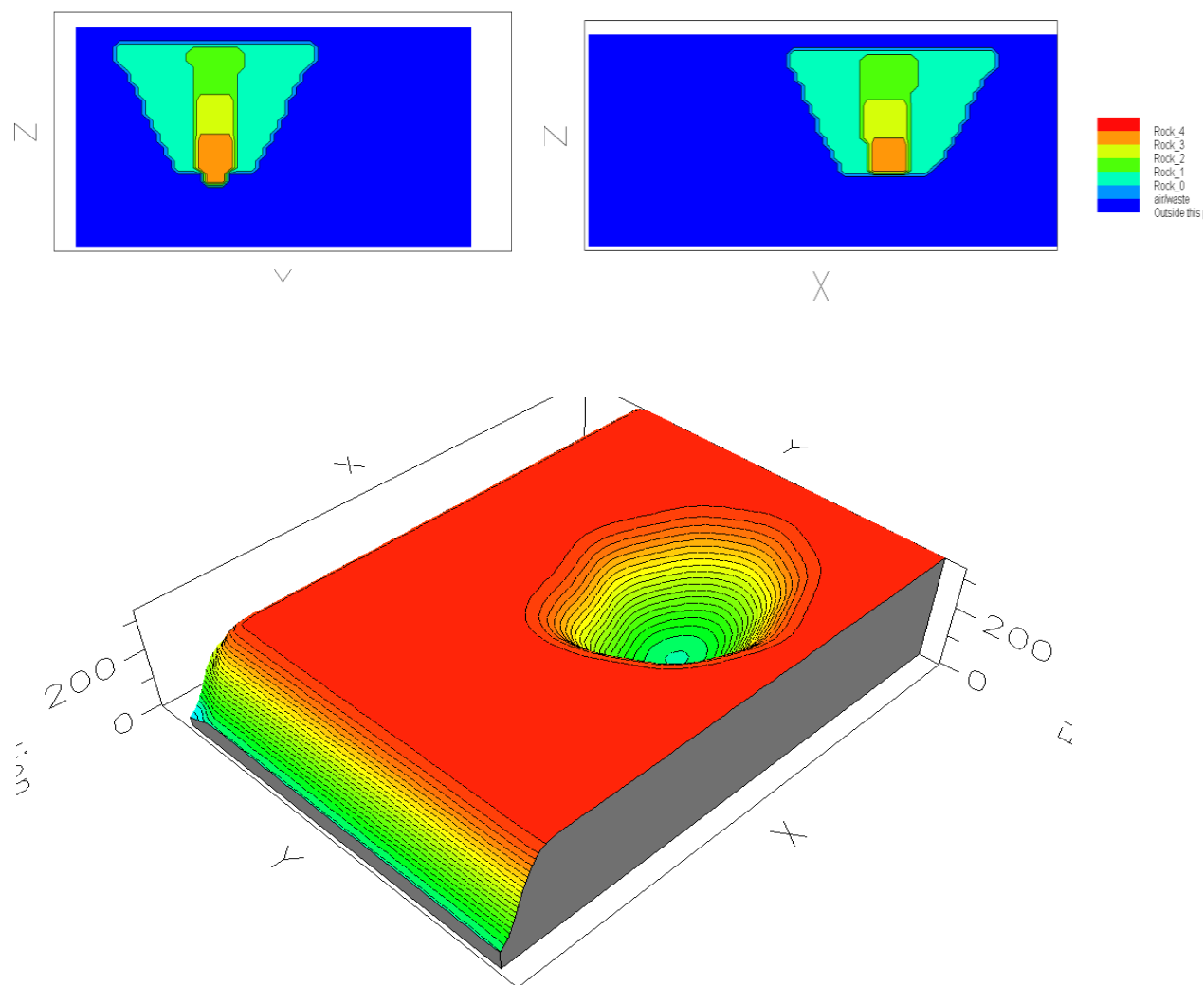


Рис. 6.11. Оптимизированный контур карьера трубки «Заполярная»

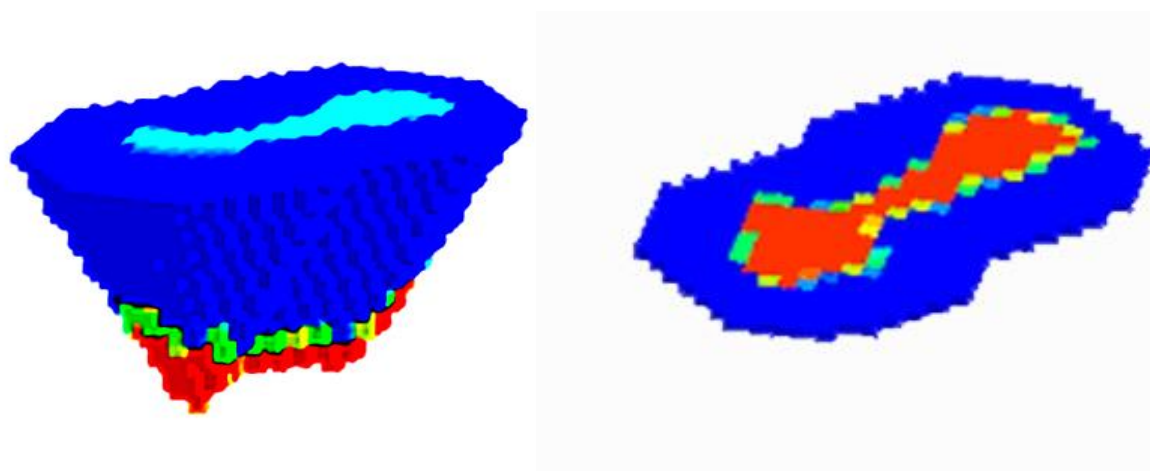


Рис. 6.12. Предельный контур и горизонтальный разрез оптимизированного карьера трубки «Заполярная»

График добычи руды в соответствии с принятым условием переработки на фабрике по геологическим блокам представлен на Рис. 6.13.

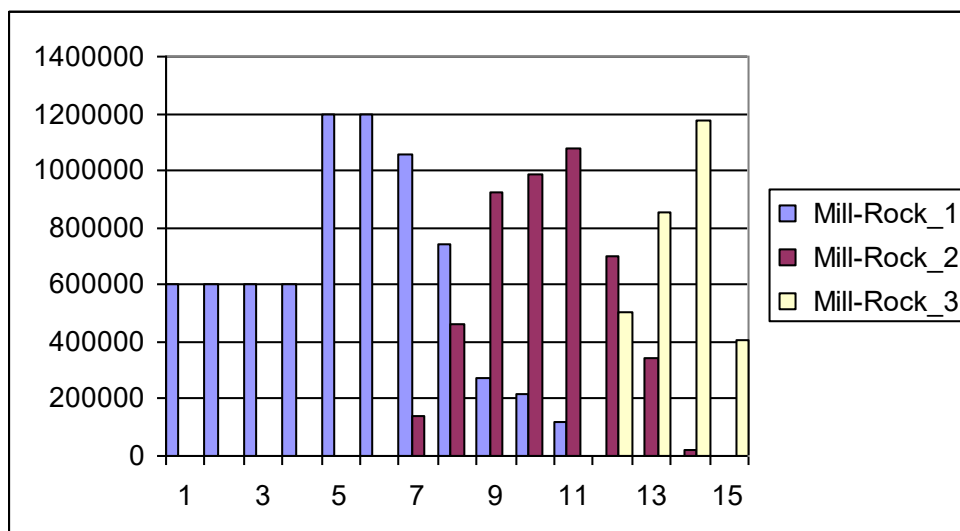


Рис. 6.13. Гистограмма добычи руды по геологическим блокам.

Поток денежных средств (CashFlow) отработки месторождения представлен на Рис. 6.14.

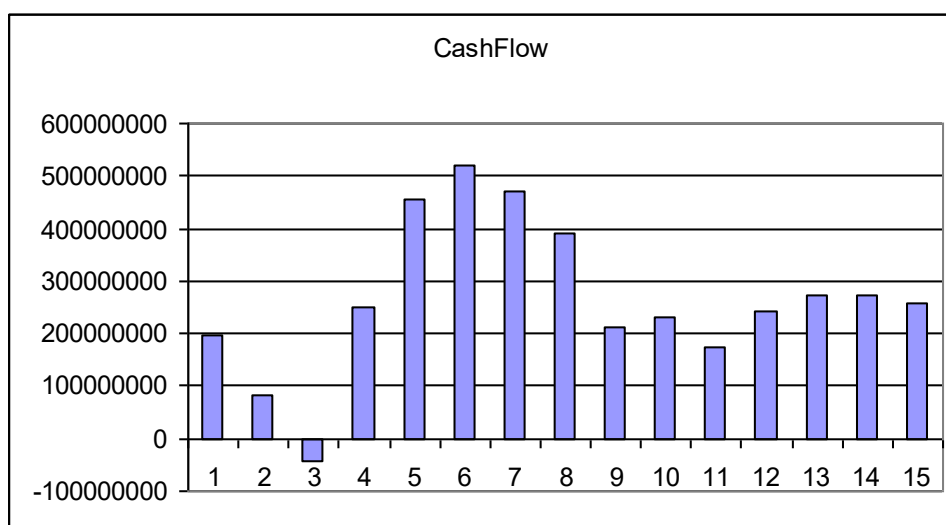


Рис. 6.14. Гистограмма потока денежных средств

Необходимо отметить, что проведенная оптимизация контура карьера месторождения основана на данных Нюрбинского ГОКа и носит аналоговый характер. Расчетные данные являются прогнозными и проведены в основном для предварительной оценки эффективности отработки месторождения трубки «Заполярная».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы горно-геологического моделирования и оптимизации разработки месторождений алмазов.

Приведены данные о геологии кимберлитовых месторождений, физико-механических свойствах слагающих их пород и технологии отработки запасов. Построены комплексные цифровые модели для промышленных месторождений алмазов. Изложены вопросы оптимизации сети разведочных скважин и границ карьеров по максимуму прибыли для ряда эксплуатируемых алмазоносных трубок.

Описаны текущие проблемы технологии отработки запасов кимберлитовых руд. Предложены методы решения оптимизационных задач управления качеством алмазоносного сырья.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОБЕСПЕЧЕНИЯ

ОБЗОР

ПРОГРАММНОГО

Современные геоинформационные системы горно-геологического направления представляют собой многофункциональные программно-аппаратные комплексы, используемые для ввода, хранения, редактирования, моделирования и анализа пространственных данных, включая разнообразные средства визуализации и вывода результатов (как в табличном виде, так и в виде графики и изображений) [13].

Реальный мир, нас окружающий, нуждается в рассмотрении с различных точек зрения, каждая из которых зависит от стоящих перед исследователем задач. В идеальном случае ГИС будет моделировать оцифрованную (то есть приведенную к удобному для компьютерной обработки виду) информацию, отображающую все данные, принадлежащие рассматриваемой части реального мира. Посредством использования объектно-зависимого представления данных при хранении в сочетании с интеграцией и цифровой обработкой геометрических примитивов, аппаратом атрибутов, геоинформационная система может использоваться для сбора и представления данных, отвечающих поставленным требованиям.

В течение последних лет горно-геологические компании успешно внедряют новые технологии практически в каждом направлении своей деятельности, начиная от разведки месторождений и кончая переработкой руды. Эти технологии позволяют специалистам получать большую отдачу от ускоряющегося технического прогресса. Требуемые темпы повышения эффективности производства не компенсируются только повышением мощности горного оборудования. Зачастую неэффективность принимаемых производственных решений обусловлена отсутствием современной нужной информации. Эта проблема решается средствами информационных технологий, которые еще недостаточно развиты в Российской горной промышленности. Мощные интегрированные информационные системы предоставляют большой набор полезных инструментов для моделирования месторождений и горного планирования, объединяя и эффективно используя данные, полученных из различных источников [14].

Сегодня на мировом рынке коммерческих компьютерных программ для горных предприятий работают десятки фирм, предлагающих более 1000 программных продуктов различного класса, предназначенных для автоматизации самых различных функций управления горным производством. Причем решением специфических задач горного, геологического и маркшейдерского направления занимаются в основном ведущие западные фирмы. Отечественные программы этого направления пока трудно назвать коммерческими, хотя есть примеры разработок в фирме ИНТЕГРА, институте ВИОГЕМ, Гипроруде, Горном институте КНЦ РАН, институте Геоинформсистем.

В настоящее время предлагается более десятка интегрированных пакетов горно-геологического назначения. Обычный набор функций интегрированной системы включает в себя:

- Управление Базами Данных;
- Интерактивная 3-х мерная графика и картирование;
- Статистическая и геостатистическая обработка информации;
- Трехмерное моделирование геологических объектов;
- Проектирование открытых и подземных горных работ-;
- Планирование развития рудников и календарное планирование;
- Маркшейдерские расчеты.

В системах разных компаний обычно имеются дополнения к стандартному набору, которые заметно расширяют возможности программного продукта.

На рудниках обычно используются пакеты программ для геологии, горного планирования, маркшейдерии и различных производственных нужд. Эти программы и

покупаются у специализированных компаний или разрабатываются на самом предприятии. В любом случае они автоматизируют решение отдельных задач и оцениваются в соответствии с тем, насколько они подходят для нужд конкретного производства.

Имеется несколько лидирующих в мире компаний (Datamine, Gemcom, Micromine, Maptek, Mintec и Surpac), которые предлагают на рынке такие системы.

Программа Gems разработана канадской компанией Gemcom Software International Inc. и включает в себя все требуемые функции, начиная от ввода первичных данных и заканчивая блочным моделированием месторождений, проектированием и планированием открытых и подземных горных работ. Система является одной из самых распространенных в мире и включает в себя следующие основные модули:

- Управление данными геологоразведки;
- Геологическое опробование;
- Моделирование месторождений;
- Геомеханические расчеты;
- Проектирование карьеров и шахт;
- Планирование горных работ;
- Календарное планирование и производственная программа;
- Контроль производства;
- Управление работой горного оборудования;
- Экологическое моделирование;
- Управление документооборотом предприятия;
- Маркшейдерские расчеты;

Программы системы построены таким образом, чтобы работать в отдаленных местах, главным образом – на горных предприятиях, при минимуме технической поддержки и обучения.

В последнее время на основе своей системы разработан специальный продукт, который они назвали IRAMS (The Integrated Resource Asset Management System). Это интегрированная компьютерная система управления минеральными ресурсами, которая может использоваться на большинстве горных производств и выполнять различные операции, характерные для горных предприятий. Она способна управлять запасами руды и оптимизировать оценку минерального сырья, планировать горные работы и погашение запасов, что является стержнем любого горного производства.

Австралийская компания Maptek разработала и продает мощную и достаточно дорогую интегрированную систему Vulcan, имеющую большой набор модулей для решения самых разных задач в области геологии, горного дела, маркшейдерии, экологии:

- Набор программ для детальной обработки геологоразведочной информации;
- Инструменты для моделирования геологических объектов, в т.ч. - месторождений нефти и газа;
- Геостатистическое исследование месторождений и различные виды кригинга;
- Моделирование и расчет гидрогеологических характеристик объектов;
- Проектирование карьеров и подземных рудников на рудных и пластовых месторождениях;
- Моделирование устойчивых бортов карьеров геомеханические расчеты;
- Контроль качества добываемой руды;
- Проектирование массовых взрывов на подземных рудниках;
- Оптимизация календарного плана горного предприятия;
- Проектирование генпланов предприятий;
- Моделирование экологических ситуаций;
- Детальные маркшейдерские расчеты, графика. Использование возможностей систем точного географического позиционирования (GPS);
- Возможности высокоточного лазерного моделирования объектов (I-Site);

- Интерфейсы для импорта/экспорта информации для большинства горных систем и общераспространенных пакетов программ;
 - Мощные средства для получения изображений и вывода графики;
- Система имеет всего около 250 установок по всему миру.

Американская компания Mintec Inc. сравнительно давно (с 70-х годов) одна из первых вышла на рынок со своей интегрированной системой Medsystem. Фирма насчитывает около 300 пользователей. Новое название главного компьютерного продукта – MineSight.

Система особенно широко распространена на горных предприятиях США и Канады. Она имеет кроме ядра пять основных модулей, каждый из которых – набор нескольких или многих специализированных программ:

- Геологический модуль;
- Обработка данных по скважинам, статистика и компонование;
- Блочное моделирование;
- Геостатистика;
- Оценка запасов руды;
- Горно-инженерный модуль (карьеры);
- Оптимизация карьеров (Лерч-Гроссман, плавающий конус);
- Оценка извлекаемых запасов;
- Проектирование карьеров;
- Календарное планирование;
- Планирование горных работ;
- Система контроля качества руды;
- Краткосрочное планирование горных работ;
- Блочное моделирование на основе скважин БВР;
- Проектирование размещения скважин в блоке;
- Маркшейдерские расчеты;
- Проектирование подземных рудников;
- Системы горных выработок;
- Потери и разубоживание;
- Оценка извлекаемых запасов;
- Моделирование пластовых месторождений;
- Трехмерные модели пластов;
- Проектирование отработки пластовых месторождений.

Кроме названной системы в перечень продуктов компании входят:

- Visualiser – программа для 3-х мерного изображения данных на экране.
- Acquire – оптимальное управление данными геологоразведки и горного производства.
- DSS – система кодирования и охраны информации.

Datamine является одной из лидирующих в мире систем управления горным производством и получила наибольшее распространение в России.

Созданная Mineral Industries Computing Limited специально для разработки и эксплуатации горняцких программ, система Datamine находит применение в вводе и анализе геологических данных, геологоразведке, геологии, геохимии, геодезии, моделировании рудных тел, проектировании подземных горных работ, проектировании шахт, планировании производства.

Datamine построена на базе так называемого ядра системы (Core), сочетающего в себе функции управления данными посредством использования реляционной технологии, а также графические, статистические функции и функции обработки данных, полученных при помощи скважин. Ядро содержит все средства, необходимые для ввода и обработки данных из самых различных источников.

Для большего числа пользователей, особенно работающих в области геологоразведки, ядро удовлетворяет их требованиям. Ядро системы может быть комбинировано с любым числом следующих модулей расширения:

- геологоразведочной статистики;
- обработки маркшейдерских данных, генерации разрезов, изограмм;
- цифрового моделирования рельефа;
- твердотельного моделирования трехмерных объектов;
- трехмерного блочного моделирования рудных месторождений;
- моделирования пластов;
- расширенной геостатистики (включает в себя функции подбора моделей вариограмм, плоскостного и трехмерного кригинга);
- планирования подземных выработок;
- проектирования открытых разработок;
- оптимизации открытых выработок методом Лерчса-Гроссмана;

Австралийская компания Surpac Software International является быстро развивающейся компанией, которая продала к настоящему моменту более 2800 лицензий по всему миру (в 85 странах используется эта программа). На сегодня лидер по количеству продаж в мире. Компания образована в 1982г., разрабатывает программное обеспечение для разведки, планирования горных работ и экологии. Основное направление – горнорудное производство.

Кроме достаточно развитой и мощной системы Surpac Vision, предлагает ряд других продуктов:

Quarry Современный пакет для горных предприятий химической, неметаллорудной и строительной промышленности. В него включены функции проектирования карьеров и планирования производства.

Scheduling Пакет создан для всестороннего календарного планирования любого горного производства.

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

DrillKing Обработка данных по разведочным скважинам.

Система Surpac Vision – состоит из следующих модулей:

- Моделирование и оценка запасов месторождений, включая геостатистику;
- Проектирование карьеров;
- Проектирование подземных рудников;
- Маркшейдерские расчеты;
- Контроль качества рудопотоков;
- Календарное планирование;
- Обработка геологоразведочной информации;
- Обработка данных по скважинам, включая каротаж.

Имеется практическое руководство пользователя с реальными данными, гарантирующее быстрое обучение и продуктивность изучения; система совместима с наиболее популярными СУБД и легка в использовании; цена ниже, чем у аналогичных систем, однако достаточно высокая. После приобретения программного продукта гарантируется техническая поддержка и услуги консультантов.

Компания имеет представительства в Северной и Южной Америке, Канаде, Австралии, Китай, Индия, ЮАР, Англии. Агентства представлены, кроме перечисленных стран в Финляндии, Германии, Франции, Зимбабве, Индонезии и т.д. Компания зарекомендовала себя на мировом рынке ПО как высокопрофессиональная и отвечающая современным требованиям. Применение подобных программных продуктов дает возможность совершить качественный скачок в проектировании горнорудных предприятий, а также в планировании горных работ и производственных процессов непосредственно на предприятиях.

Пакет Micromine разрабатывался австралийской фирмой Micromine Pty Ltd (Австралия) с 1986г., главным образом для геологической индустрии. Он имеет много процессов и инструментов для решения задач, возникающих при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Одна из основных задач пакета - это моделирование месторождений и оценка запасов. Программа разработана под Windows/NT и совместима с любыми базами данных.

Пакет имеет полный набор инструментов для решения следующих задач:

1. Создание баз данных и работа с ними. Базы данных геологоразведочных организаций создаются и поддерживаются в пакете в табличном формате. Данные могут импортироваться в пакет из любых стандартных продуктов Windows или текстовых форматов, вводиться дигитайзером или импортироваться из систем GPS.

2. Проверка данных опробования и геологической документации на предмет возможных ошибок при их вводе.

3. Создание графики: разрезов, планов, трехмерных изображений с выводом любых данных (результаты опробования, геологические коды, гистограммы, заливки и пр.).

4. Классический статистический анализ геологоразведочной информации (опробование, геохимия, геофизика) с выводом на печать графиков гистограмм, таблиц и результатов их анализа.

5. Интерактивная трехмерная интерпретация геологических разрезов и планов (геология, минерализация и пр.) с кодировкой каждого периметра.

6. Интерактивное трехмерное каркасное моделирование рудных тел, геологических формаций и поверхностей.

7. Полный геостатистический анализ любых трехмерных данных, включая расчет и моделирование вариограмм, карт вариаций изменчивости и оценки пространственной анизотропии минерализации.

8. Построение блочных моделей с заданным размером элементарных блоков.

9. Интерполяция содержаний в элементарных блоках моделей, используя известные алгоритмы и кригинг.

10. Возможность оценки запасов методом разрезов в пределах каркасных моделей или с использованием блочных моделей.

11. Трехмерная визуализация любых данных поддерживаемых Micromine с выводом их на печать.

Кроме того, пакет имеет модули и процессы для ввода и обработки:

- Геохимических и геофизических данных; геодезических данных с возможностью трансформации географических сетей; горных данных с возможностью проектирования карьеров и буровзрывных работ.
- При обработке информации в пакете предусмотрены макросы, которые значительно облегчают эту работу.
- В настоящее время пакет полностью русифицирован.

Свою деятельность в России компания начала в 2001 году (представительство в Санкт-Петербурге). За это время клиентами фирмы стали несколько десятков горнодобывающих, проектных и сервисных компаний, имеющих в своем пользовании по несколько рабочих мест, оборудованных программной системой Micromine. Для продвижения своих продуктов в компании разработаны курсы пользователей и методические пособия различной степени сложности. В компании имеется группа программной поддержки для разработки приложений под специализированные задачи заказчиков.

Программы оптимизации карьеров по максимуму прибыли.

Краткие сведения об основных коммерческих продуктах, реализующих алгоритм Лерчса-Гроссмана, следующие:

Gemcom Whittle компании Whittle Programming, входящий в состав канадской фирмы Gemcom Software, представляет собой интегрированный пакет инструментальных средств перспективного планирования горных работ, спроектированный для профессиональных горных инженеров. Пакет поставляется в виде расширяющегося ряда модулей, что повышает его производительность и полезность.

NPV Scheduler Earthworks, являющейся дочерней фирмой компании Datamine, имеет практически тот же набор функций что и предыдущий оптимизатор, однако он предоставляет несколько более расширенные средства проектирования стадий отработки и оптимизации графика добычи, таким образом NPV Scheduler позволяет находить как предельный карьер, так и оптимальный карьер.

MineMAX Planner компании MineMax объединяет технологию оптимизации с интерактивной 3-D визуализацией, обеспечивая горного инженера дружественным инструментарием быстрого определения оптимальных карьеров и выполнения анализа стратегии добычных работ.

Примерная стоимость однопользовательской лицензии (базового варианта) для рассматриваемых программ составляет: Gemcom Whittle – 15 тыс. долларов, NPV Scheduler – 12 тыс. долларов и MineMax – 6.5 тыс. долларов США.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Анализ данных

- анизотропия, 70
- геостатистика, 63
- геостатистика
 - ковариационные функции, 68
- декластеризация проб, 61
- изменчивость геопоказателей, 70
- моделирование вариограмм, 72
- расчет координат проб по инклинометрии, 61
- составление композитных проб, 62
- ураганные пробы, 60

Блочное моделирование, 48

- интрузии, 54
- массивные тела, 54
- объединение моделей, 56
- переблокировка, 57
- пластовые тела, 53
- складки, 55
- структурные элементы, 51
- топография, 52

Геология кимберлитов

- Алакит-Мархинское поле, 17
- алмазоносность, 31
- гипотезы происхождения, 14
- Далдынское поле, 18
- коренные месторождения алмазов, 21
- Мирнинское поле, 17
- морфология месторождений, 29
- петрография, 18
- Якутская алмазоносная провинция, 9

Геология кимберлитовых трубок

- Накынское поле, 17

Геостатистика

- модели вариограмм, 77
 - сферическая, 78
- модели вариограмм
 - экспоненциальная, 78
- модели вариограмм
 - гауссова, 78
- модели вариограмм
 - степенная, 78
- экспериментальная вариограмма
 - общая вариограмма, 76
 - полувариограмма, 76
 - родограмма, 76
- экспериментальная вариограмма
 - ковариация, 76
- экспериментальная вариограмма

- парная вариограмма, 76

- экспериментальная вариограмма
 - логарифмическая вариограмма, 76
- экспериментальная вариограмма
 - мадограмма, 77

- экспериментальные вариограммы, 75

Интерполяция, 119

- линейный метод, 119
- метод ближайшей точки, 119
- метод Кригинга, 125
 - обычный, 129
- метод Кригинга
 - универсальный, 130
- метод Кригинга
 - дрифт, 130
- метод Кригинга
 - анизотропия, 130
- метод обратных расстояний, 120
- метод полиномиальной регрессии, 122
- метод соседних регионов, 121

Каркасное моделирование, 42

- рельеф местности, 43
- триангуляция, 44

Методы оценки запасов, 133

- выбор метода, 157
- метод многоугольников, 147
- метод осаждения слитка, 152
- метод разрезов, 149
 - непараллельных, 151
 - параллельных, 150
- метод регулярных блоков, 155
- метод среднеарифметического, 140
 - геологических блоков, 143
 - суммарный, 141
 - эксплуатационных блоков, 144
- метод треугольников, 145
- погрешность, 160
 - надежность определения, 161
 - ошибка модели содержаний, 171
 - систематическая ошибка, 164
 - систематическая ошибка для пуассоновской модели, 166
 - случайная ошибка, 168
- статистический метод, 154

Методы подсчета запасов

- стохастическая имитация, 155

Модели месторождений, 193

- трубка Ботубинская, 231
- трубка Зарница, 217

- трубка Камачия, 234
- трубка Комсомольская, 212
- трубка Нюрбинская, 193
- трубка Удачная, 222
- трубка Юбилейная, 200
- Моделирование
 - метод имитации состояний, 130
 - построение комплексной модели, 33
 - районирование по взрываемости
 - трубки Нюрбинская, 185
 - районирование по взрываемости
 - трубки Юбилейная, 181
 - файлы и процессы, 38
 - физико-механические свойства
 - кимберлитов, 177
 - формирование базы данных, 36
- Оптимизация карьеров, 238
 - исходные параметры, 255
 - метод Лерчса-Гроссмана, 241
 - определение конечных контуров, 239
 - определение конечных контуров, 256
 - построение экономической модели,
 - 244
 - трубка Заполярная, 263
 - трубка Зарница, 260
 - трубка Нюрбинская, 257
 - углы откосов бортов, 244
 - характеристики оптимизаторов, 243
- Подсчет запасов
 - классификация, 134
 - категории разведанности, 135
 - международная рамочная, 136
 - по степени подготовленности, 135
 - промышленные запасы, 135
 - классификация
 - балансовые запасы, 135
 - классификация
 - погашенные запасы, 135
 - классификация
 - минимально промышленное
 - содержание, 135

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Автоматизация** геолого-маркшейдерских графических работ /В.В.Ершов, А.С.Дремуха, В.М.Трость и др. – М.: Недра, 1991. –347с.
2. **Айвазян С.А.** Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. -М.: Финансы и статистика, 1983.
3. **Алферов А.Ю., Васильев П.В., Кинзерская Е.А.** Состояние и тенденции компьютеризации геолого-маркшейдерского обеспечения горных работ. //Маркшейдерский вестник, 1996. -№1. -С.22-31.
4. **Арсентьев А.И.** Определение производительности и границ карьера. -М.: Недра, 1970. -320с.
5. **Батугин С.А., Черный Е.Д.** Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. -Новосибирск:Наука, 1998. -344с.
6. **Бекжанов Г.Р.** Геологические модели при прогнозировании ресурсов полезных ископаемых. -М.:Недра, 1987.
7. **Бобриевич А.П.** Алмазные месторождения Якутии. -М.:Изд-во литературы по геологии и охране недр, 1959.
8. **Бондаренко А.Т.** Физические свойства кимберлитов и вмещающих их осадочных горных пород Зимнебережного алмазоносного поля. // Руды и металлы, 1995. -№3. -С.90-96.
9. **Боярский А.Я.** Общая теория статистики. -М.:Изд-во Московского университета, 1985.
10. **Букринский В.А.** Геометрия недр: учебник для вузов. 2-е изд. –М.: Недра, 1985. -526с.
11. **Ваганов В.И.** Алмазные месторождения Мира. -М.:Геоинформмарк, 2000. -312с.
12. **Валуев Е.П.** Компьютерные технологии расчета оптимальных границ карьеров и календарного планирования открытых горных работ. //Материалы Шестого международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях» - Белгород: ВИОГЕМ, 2001. -С.190-196.
13. **Васильев П.В.** Моделирование пространственных структур методами стохастической геометрии. // Научные ведомости. Белгородский Государственный Университет. Серия: Информатика, Прикладная математика и Управление. Изд. БелГУ, 2006. -т.1. -№2. -С.67-75.
14. **Васильев П.В.** Развитие горно-геологических информационных систем. Информационный Бюллетень ГИС Ассоциации, 1999. -№2. -С.32-34.
15. **Васильев П.В., Колганов В.Ф.** Компьютерные технологии оптимизации контуров карьеров на основе геолого-математических моделей месторождений. //Материалы Седьмого международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях» - Белгород: ВИОГЕМ, 2003. -С.424-429.
16. **Васильев П.В., Уиттл Д.** Блочное моделирование месторождений при оперативной оценке запасов и оптимизации добычи руд. // Материалы 5-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". Белгород:Виогем,1999. -т.2. -С.351-362.
17. **Васильев П.В., Уиттл Д.** Построение экономической блочной модели месторождения при решении задачи оптимизации контуров карьера. //Материалы 4-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". – Белгород:Виогем, 1997. -С.286-296.

18. **Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю.** Моделирование в разведочной геофизике. -М.:Недра, 1987. -194с.
19. **Венецкий Н.Г.** Основы математической статистики. -М.:Госстатиздат, 1963.
20. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. -М.:Высшая школа, 1999. -576с.
21. **Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. -М.: Наука, 1988.
22. **Викентьев В.А., Карпенко И.А., Шумилин М.В.** Экспертиза подсчетов запасов рудных месторождений. -М.:Недра, 1988
23. **Владимиров, Б.М., Дауев Ю.М., Зубарев Б.М.** Геология и генезис алмазных месторождений. -М.: ЦНИГРИ, 1989.
24. **Давид М.** Геостатистические методы при оценке запасов руд. -Л.:Недра, 1980.
25. **Давыденко А.Ю.** Прямая задача для вероятностного распределения гравитационного поля над случайно-неоднородным объектом и ее значение для интерпретации данных и планирования геофизического эксперимента. // Геофизика и математика. Матер.2-й Всеросс. конф. Под ред. В.Н.Страхова, Пермь, Горный ин-т УрО РАН, 2001. -С.73-79.
26. **Дэвис Дж.С.** Статистический анализ данных в геологии: Пер. с англ. В 2 кн. -М.:Недра, 1990. -746с.
27. **Емельяненко П.Ф., Яковлева Е.Б.** Петрография магматических и метаморфических пород. -М.:Изд-во Московского университета, 1985
28. **Ермолов В.А.** Геолого-экологическое обеспечение управления качеством руд в процессах рудоподготовки. Учебное пособие. -М.:МГИ, 1997.
29. **Ершов В.В.** Геолого-маркшейдерское обеспечение управления качеством руд. – М.:Недра, 1986. –260с.
30. **Зинчук Н.Н.** Петрофизические характеристики криогенных кимберлитов и вмещающих их пород Накынского поля Якутии в связи с поисками алмазов. Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. -Мирный, 1998.
31. **Зинчук Н.Н.** Кимберлитовая трубка Удачная. –Новосибирск:Издательство Новосибирского университета, 1993.
32. **Зинчук Н.Н.** Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. -М.:Недра, 2002.
33. **Илупин И.П., Ваганов В.И., Прокопчук Б.И.** Кимберлиты. -М.:Недра, 1990.
34. **Каждан А.Б.** Математические методы в геологии, М.:Недра. -1990.
35. **Каждан А.Б.** Разведка месторождений полезных ископаемых, М.:Недра. -1977.
36. **Каминский Ф.В.** Алмазоносность некимберлитовых изверженных пород. -М.:Недра, 1989.
37. **Каневский М.Ф., Арутюнян Р.В., Большое Л.А. и др.** Геостатистический подход к анализу Чернобыльских выпадений. //Известия РАН. Энергетика, 1995. -№3. -С.47-55
38. **Капутин Ю.Е.** Горные компьютерные технологии и геостатистика. -Санкт-Петербург:Недра, 2002. -424с.
39. **Капутин Ю.Е.** Информационные технологии планирования открытых горных работ. -Санкт-Петербург:Недра, 2004. -424с.
40. **Классификация** запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. -М.:Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов Российской Федерации – ГКЗ, 1997. -16с.
41. **Ковальский В.В.** Кимберлитовые породы Якутии изд-во Академии наук СССР. -М.:1963.
42. **Коган И.Д.** Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений. -М.:Недра, 1974.
43. **Колганов В.Ф.** Геолого-математическое моделирование кимберлитовых месторождений Якутской алмазоносной провинции. Научно-практическая

- конференция «Особенности освоения алмазоносных кимберлитовых трубок Накынского рудного тела». Мирный, Сборник докладов и тезисов, 2002. -С.41-43
44. **Колганов В.Ф.** Геолого-математическое моделирование на примере кимберлитовых месторождений АК «АЛРОСА». //V Мирнинская городская научно-практическая конференция, посвященная 5-летию Мирнинского филиала ЯГУ им. М.К.Аммосова. Сборник докладов и тезисов, 1999. -С.130
45. **Колганов В.Ф.** Компьютерные технологии моделирования, оптимизации и планирования горных работ на кимберлитовых месторождениях. Computer technologies of modeling, optimization and mining scheduling at the kimberlite deposits. IV международная конференция «Новые идеи в науках о земле». -М.:МГГРУ, 2003. – Том 3. -С.58-59.
46. **Колганов В.Ф. Бондаренко И.Ф.** Взаимосвязь физико-механических свойств и петрографического состава кимберлитов. «Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений»//Руда и металлы, 2001. -С.356-361.
47. **Колганов В.Ф.** Выбор оптимального размера сети геологического опробования с использованием метода геостатистики Cox point process.//Горная промышленность,1998. -№3. -С.45-47
48. **Колганов В.Ф.** Компьютерные технологии при определении экономической эффективности отработки месторождения тр. «Нюрбинская». //Научно-практическая конференция «Особенности освоения алмазоносных кимберлитовых трубок Накынского рудного тела». Сборник докладов и тезисов -Мирный, 2002. -С.34-36.
49. **Колганов В.Ф.** Назначение и использование программы Datamine в АК «АЛРОСА» //Горный журнал, 2002. -№2. -С.80-85.
50. **Колганов В.Ф.** Практика применения программного обеспечения «Дататайн» при отработке месторождений алмазов. //Тезисы научного симпозиума «Неделя горняка-2002». -М.:МГГУ, 2002. -С.205
51. **Колганов В.Ф.** Практика применения программного обеспечения Datamine в АК «АЛРОСА». //ГИАБ, 2003. -№8. -С.192-195
52. **Колганов В.Ф.** Программное обеспечение “NPV-Scheduler” при планировании и оптимизации горных работ. «Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений». //Руда и металлы, 2001. -С.375-379.
53. **Колганов В.Ф., Бондаренко И.Ф.** Определение физико-механических свойств кимберлитов на основе данных макропетрографического анализа опорных горизонтов трубки «Удачная» //Горный журнал, 2000, -№9, С.8-11
54. **Колганов В.Ф., Солоневич В.А.** Оценка технико-экономического риска отработки кимберлитовых месторождений на стадии проектирования. //Пути решения актуальных проблем добычи и переработки полезных ископаемых, часть1. -Якутск, 2003. -С.70-73.
55. **Компьютеры и системы управления в горном деле за рубежом** /А.С.Астафьев, Н.И.Зеленский, Н.И.Горлов и др. – М.:Недра, 1989. – 264 с.
56. **Коровов С.Д.** Пространственная модель геологического блока. //Горные науки и промышленность. - М.: Недра, 1989. С.274-279.
57. **Крамбейн У.** Статистические модели в геологии. -М.:Мир,1969.
58. **Кудряшов П.И.** Геометризация и учет запасов месторождений твердых полезных ископаемых. -М.: Недра, 1981.
59. **Кузьмин В.И.** Геометризация и подсчет запасов месторождений твердых полезных ископаемых. -М.: Недра, 1967.
60. **Лазыко Е.Е.** Минералы-спутники алмаза и генезис кимберлитовых пород, М.:Недра,1989
61. **Львовский Е.Н.** Статистические методы построения эмпирических формул. -М.:Высшая школа, 1988.

62. Мальцев В.А. О некоторых свойствах линейного кригинга //Практическая геостатистика / Тр. всесоюзного семинара КНЦ АН СССР,1991.
63. Мальцев В.А. Практическое руководство по применению геостатистических методов оценки в геологии (на базе программной системы СЗТ) / ВИМС— М.:ВИЭМС; МГП "Геоинформарк",1991.
64. Мальцев В.А., Павлова Л.П., Петров В.А., Рябев В.Л. Метод разрежения разведочной сети // Разведка и охрана недр,1983. -№ 12. -С.14—17.
65. Маршанцев В.К. Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии. -Новосибирск:Наука, 1986.
66. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. –М.:Мир, 1968. –408с.
67. Мельников Н.В., Арсентьев А.И., Архипов А.В., Бастан П.П. и др. Совершенствование методов проектирования и планирования горных работ в карьере. -Л.:Наука, 1981. -280с.
68. Милашев В.А. Кимберлиты и глубинная геология. –Л.:Недра,1990
69. Милашев В.А. Структуры кимберлитовых полей. -Л.:Недра, 1979
70. Милашев В.А. Трубки взрыва. –Л.:Недра, 1984.
71. Милютин А.Г. Геология и разведка месторождений полезных ископаемых, -М.: Недра,1989.
72. Минорин В.Е и др. Оценка и разведка коренных месторождений алмазов. -М.:ЦНИГРИ, 2000.
73. Минорин В.Е. Оценка и разведка коренных месторождений алмазов, -М.: ЦНИГРИ, 2000.
74. Минорин В.Е., Маковская Н.С. Использование выборочных распределений для оценки алмазности коренных месторождений и расчета величины проб / Статистические методы в геологии. Новосибирск, 1974.
75. Мягков В.Ф., Быбочкин А.М., Бугаев И.И Рудничная геология. -М.:Недра, 1986.
76. Основы геоинформатики. В 2кн. Учебное пособие для студ.вузов./ Е.Г.Капралов, А.В.Кошкарёв, В.С.Тикунов и др. – М.: Изд-во Академия, 2004. –832с.
77. Петров В.А., Мальцев В.А. Зависимость оценки сложности геологических объектов от плотности сети наблюдений. //Разведка и охрана недр, 1986. -№12. -С.18—21.
78. Погребницкий Е.И., Терновой В.И. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. -Л.: Недра. 1974. -304с.
79. Положение о порядке учета запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов. /Приказ МПР России 9 июля 1997. -№ 122.
80. Прерис А.М. Определение и учёт ураганных проб. –М.:Недра, 1974. -104с.
81. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. -М.:Наука, 1979, 496с.
82. Родионов Д.А. Справочник по математическим методам в геологии. -М.:Недра. - 1987.
83. Рожков И.С., Буров А.П., Прокопчук Б.И. Геологические основы и методика поисков и разведки месторождений алмазов. -М.:Недра, 1970.
84. Рыжов П.А. Геометрия недр. –М.:Углетехиздат, 1952. -390с.
85. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле. -М.:Высшая школа, 1973.
86. Трофимов В.С. Геология месторождений природных алмазов. -М.:Недра, 1980.
87. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. -М.:Мир, 1981.
88. Фомин А.С. Геология и динамика формирования кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции /Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. -Мирный, 1998
89. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. -М.:Недра, 1998.
90. Хохряков В.С. Экономико-математическое моделирование и проектирование карьеров. -М.:Недра, 1977.

91. Четыркин Е.М. Вероятность и статистика, -М.:Финансы и статистика,1982.
92. Шафрановский И.И. Алмазы. -М.:Наука,1964.
93. Шестаков Ю.Г. Математические методы в геологии. -Красноярск:Изд-во Красноярского университета, 1988.
94. Шкодзинский В.С. Происхождение кимберлитов и алмаза. –Якутск:СО РАН, 1995.
95. Эдни Дж. Теория статистики. -М.:Госстатиздат,1960.
96. ArcView GIS. ArcView Spatial Analyst. - Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., 1996
97. Armstrong M. Common Problems Seen in Variograms. *Mathematical Geology*, ,1984, V.16, pp.305-316.
98. Armstrong M. Semivariogram modeling by weighted least squares. *Mathematical Geology*, 1986, V.22, pp.387-390.
99. Barnes R.J. The Variogram Sill and the Sample Variance. *Mathematical Geology*, V.23., No.4, 1991.
100. Caccetta L. and Hill S.P. An Application of Branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling. *Journal of Global Optimization*, Volume 27, Numbers 2-3. November 2003, pp.349 – 365.
101. Clark I. *Practical Geostatistics*. Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, repr.1984
102. Cressie N. *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons, New-York, 1991, 900p.
103. David M.. *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Elsevier Applied Science Publishers, Amsterdam B.V. 1988
104. Deutsch C.V, Journel A.G. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University press. New York, Oxford, 1998, 369p.
105. Dowd P.A. and Onur A.H. Optimization of open-pit mine design: Part 1. Optimal open-pit design. *Transactions of the IMM*, 1993, No.102, A95-A104.
106. Dowd P.A. *Generalized cross-covariances. Geostatistics*, vol.1, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1989.
107. *Engineering and Design: Practical aspects of applying geostatistics at hazardous, toxic and radioactive waste sites*. Technical Letter ETL 1110-1-175, Department of the US Army, Washington, 30 Jun 1997, 93p.
108. Frimpong S., Szymanski J. and Narsing A. A Computational Intelligent Algorithm for Surface Mine Layouts Optimization. *Simulation*, 2002, Vol. 78, No. 10, pp.600-611.
109. Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, 1997.
110. Gy P.M. *Sampling for analytical purposes*. John Wiley and Sons, 1998.
111. Henley S. *Russian Mineral. Mining Journal*, London, August 20, 2004 v.21, pp.18-21
112. Isaaks E.H., Shrivastava R.M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University press, Oxford, 1989.
113. Journel A.G. Nonparametric estimation of spatial distributions. *Mathematical Geology*. V.15, 1983, pp.445-468.
114. Journel A.G., Huijbregts Ch.J. *Mining Geostatistics*. London: Academic Press. 1978, 600p.
115. Kanevski M., Demyanov V., Chernov S., Savelieva E., Serov A., Timonin V., Maignan M. Geostat Office for environmental and pollution spatial data analysis. *Mathematische Geologic*, N3, April 1999, pp.73-83.
116. Kanevski M., Demyanov V., Chernov S., Savelieva E., Timonin V. *Environmental Spatial Data Analysis with GEOSTAT OFFICE Software*, Geology, Italy, 1998.
117. Khalokakaie R., Dowd P.A., Fowell R.J. Lerchs–Grossman algorithm with variable slope angles. *Mining Technology : IMM Transactions section A*, Volume 109, Number 2, August 2000, pp.77-85(9).
118. Lerchs H. and Grossman I.F. Optimum design of open-pit mines. *Canad.min.and metall.bull*, 1965, vol.68, pp.17-24.

119. Myers D.E. Pseudo-Cross Variograms, Positive-Deginiteness and Cokriging. *Mathematical Geology*, V.23, No.6, 1991
120. Pannatier, Y. *Software for Spatial Data Analysis* Springer-Verlag, New-York, 1996.
121. Papritz A. Kunsch H.R., Webster R. On the Pseudo Cross Variogram. *Mathematical Geology*, 1993, V.25, N.8
122. Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. Barnett V. ed., in *Interpreting multivariate data: John Wiley*, 1981, pp. 21-36.
123. Swan A.R.H., Sandilands M. *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell Science Ltd., Oxford, 1996, 446p.
124. Tolwinski B. and Underwood R. A scheduling algorithm for open pit mines. *IMA Journal of Management Mathematics* 1996, 7(3), pp.247-270.
125. Vakhromeyev G.S, Davydenko A.Yu. Calculation of potential fields for stochastic models of heterogeneous geological objects. *Geophysical Prospecting* 35, 1987, pp.288-311.
126. Vakhromeyev G.S, Davydenko A.Yu. Stochastic Modelling of Potential Fields for Geological Objects with Complex Internal Structure. // *Geophysical data inversion methods and applications*. Free University of Berlin, 1989, pp.273-287.
127. Vassiliev P. Optimizing Open Pit Limits without and with Ore Dressing Predictions. // *3rd Biennial Conference "Strategic Mine Planning"*. -1999. Mar. -pp.197-207.
128. Watson D.F. *Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data*, Pergamon, 1992, 321p.
129. Watson D.F. Nngridr: An implementation of natural neighbor interpolation. Technical report, Claremont, WA, Australia, 1994, 170p.
130. Whittle D., Vassiliev P. Construction Economic Ore Body Models for Open Pit Optimization. // *2nd Regional APCOM 97 SYMPOSIUM, Moscow*. -1997. Aug. -pp.511-514.
131. Whittle D., Vassiliev P. Synthesis of Stochastic Recovery Prediction and Cut-off Optimization. // *Mine to Mill 1998 Conference*. -1998, 4/9. -pp.53-55.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	8
1.1 Якутская алмазоносная провинция	8
1.2 Гипотезы происхождения кимберлитов	13
1.3 Геологические позиции проявлений кимберлитов.....	14
1.4 Возрастные аспекты кимберлитового магматизма.....	15
1.5 Петрография и классификация кимберлитов.....	17
1.6 Коренные месторождения алмазов	20
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ 32	
2.1 Методика построения комплексных моделей.....	32
2.1.1 Формирование геологической базы данных	35
2.1.2 Файлы и процессы управления базой данных	37
База данных	41
Анализ данных, пополнение базы данных	41
Топография.....	41
Контурные модели.....	41
Каркасные и блочные модели	41
Геолого-математическая модель	41
2.1.3 Каркасное моделирование.	41
2.1.4 Блочное моделирование.....	47
2.2 Опробование и подготовка данных.....	59
2.2.1 Учёт ураганных проб	59
2.2.2 Декластеризация данных	60
2.2.3 Инклинометрия скважин	60
2.2.4 Составление композитных и групповых проб.....	61
2.3 Геостатистический анализ пространственных данных.....	62
2.3.1 Ковариационные функции и вариограммы.....	67
2.3.2 Анализ пространственной изменчивости.....	69
2.3.3 Анизотропия.....	69
2.3.4 Теоретические модели вариограмм	71
2.3.5 Расчет экспериментальных вариограмм	74
2.3.6 Подбор моделей вариограмм.....	75
2.3.7 Дисперсия оценивания.....	77
2.3.8 Особенности расчета вариограмм трубки «Удачная»	78
2.4 Оконтуривание рудных тел.....	84
2.5 Представительность сети опробования	86
Интервал опробования	88
2.6 Прогнозирование развития оруденения	89
2.7 Имитационный подход к оптимизации сети опробования	91
2.7.1 Определение погрешности контуров рудных тел кимберлитовых трубок.....	94
2.7.2 Прогнозирование контуров кимберлитовых тел.....	98
2.7.3 Результаты вычислительного эксперимента.....	102
2.7.4 Определение достоверности моделирования	112
2.8 Интерполяция.....	118
2.8.1 Метод ближайшей точки	118
2.8.2 Линейный метод	118
2.8.3 Метод обратных расстояний	119

2.8.4	Метод соседних регионов.....	120
2.8.5	Полиномиальная регрессия	121
2.8.6	Кригинг.....	124
2.8.7	Метод имитации состояний.....	129
Глава 3.	Методы оценки запасов минерального сырья.....	132
3.1	Классификация запасов и терминология.....	133
3.1.1	Классификация запасов по степени разведанности	134
3.2	Подсчет запасов по моделям	137
3.3	Метод среднего арифметического	139
3.3.1	Суммарный метод.....	140
3.3.2	Метод геологических блоков	142
3.3.3	Метод эксплуатационных блоков	143
3.4	Метод треугольников	144
3.5	Метод многоугольников	146
3.6	Метод разрезов.....	148
3.6.1	Параллельные разрезы	149
3.6.2	Непараллельные разрезы.	150
3.7	Метод осаждения слитка или объёмной палетки	151
3.8	Статистический метод.....	153
3.9	Стохастическая имитация	154
3.10	Метод регулярных блоков.....	154
3.11	Выбор метода подсчета запасов	156
3.12	Оценка погрешности подсчета запасов.....	159
3.12.1	Влияние среды на надежность определения содержания алмазов.....	160
3.12.2	Математическое ожидание и дисперсия содержания алмазов в пробах.....	161
3.12.3	Систематическая ошибка подсчета запасов в блоке.....	163
3.12.4	Систематическая ошибка подсчета запасов для пуассоновской модели распределения алмазов	165
3.12.5	Случайная ошибка оценки запасов в блоке	167
3.12.6	Случайная ошибка оценки запасов для пуассоновской модели распределения алмазов	168
3.12.7	Погрешность подсчета запасов по разведочному блоку	170
3.12.8	Ошибка оценки запасов для модели содержаний	171
3.12.9	Ошибка оценки запасов для пуассоновской модели.....	172
Глава 4.	Моделирование физико-механических свойств.....	176
4.1	Взаимосвязь физико-механических свойств и петрографического состава кимберлитов.....	176
4.2	Моделирование физико-механических свойств трубки «Юбилейная» для районирования по взрываемости.	181
4.3	Моделирование физико-механических свойств трубки «Нюрбинская» для районирования по взрываемости.	185
Глава 5.	Построение моделей кимберлитовых месторождений.....	193
5.1	Модель трубки «Нюрбинская».....	193
5.2	Модель трубки «Юбилейная»	200
5.3	Модель трубки «Комсомольская».....	212
5.4	Модель трубки «Зарница»	217
5.5	Модель трубки «Удачная»	222
5.6	Модель трубки «Ботуобинская».....	231
5.7	Модель трубки «Камачия».....	234
Глава 6.	Оптимизация открытой разработки кимберлитовых месторождений.....	238
6.1	Методы оптимизации границ карьеров	239
6.2	Характеристики основных оптимизаторов карьеров	243

6.2.1	NPV Scheduler	243
6.2.2	Gemcom Whittle	247
6.2.3	Входная блочная модель.....	249
6.2.4	Проект откосов бортов карьера.....	249
	Последовательность шагов оптимизации	250
6.2.5	Программы MineMAX	251
6.3	Сопоставление работы оптимизаторов.....	254
6.3.1	Исходные данные для оптимизации контуров карьера.	255
6.4	Определение конечных контуров карьеров	256
6.4.1	Оптимизация контура карьера трубки «Нюрбинская»	257
6.4.2	Оптимизация контура карьера трубки «Зарница»	260
6.4.3	Оптимизация контура карьера трубки «Заполярная»	263
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	269
	ПРИЛОЖЕНИЕ. ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	270
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	276
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	278

Научное издание

Колганов Виталий Федорович
Бондаренко Иван Федорович
Давыденко Александр Юрьевич
Васильев Павел Владимирович

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРИ РАЗВЕДКЕ И ОПТИМИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ**

Редактор Т.А.Никитина
Художественный редактор Л.В.Матвеева
Художник Н.А.Горбунова
Технический редактор Н.М.Остроумова
Корректоры И.Л.Малышева, Л.А.Анкушева
Оператор электронной верстки А.Н.Прокошенко

Изд. лиц. №020297 от 23.06.97. Сдано в набор 06.11.08. Подписано в печать 20.01.09. Бумага ВХИ.
Формат 70x100 1/16. Офсетная печать. Гарнитура Times ET. Усл.печ.л.21,3 + 2,1 вкл. на мел. бум.
Уч. Изд. Л. 21,6. Тираж 500 экз. Заказ № 124

Сибирская издательская фирма «Наука» РАН. 630200, Новосибирск, ул. Восход, 15.
СП «Наука» РАН. 630077, Новосибирск, ул. Станиславского, 25

ISBN 978-5-02-023208-2





КОЗЛОВ ВИТАЛИЙ ФЕДОРОВИЧ

Кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией горно-геологических компьютерных технологий института «Якуттипробмаз» АК «АЛРОСА».

Научные интересы: компьютерное моделирование месторождений полезных ископаемых, стохастическое моделирование геологических объектов, геостатистика, оптимизация карьеров. Автор более 20 научных публикаций.



БОНДАРЕНКО ИВАН ФЕДОРОВИЧ

Кандидат технических наук, ученый секретарь института «Якуттипробмаз» АК «АЛРОСА».

Научные интересы: разрушение горных пород и руд измикроносных месторождений, разработка методов бездефектной добычи алмазов, моделирование взрывных процессов. Автор более 40 публикаций, в том числе 2 монографий.



ДАВЫДЕНКО АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной геофизики и геоинформатики Иркутского государственного технического университета.

Научные интересы: стохастическое моделирование геологических объектов сложного строения, вероятностно-статистические методы анализа геолого-геофизической информации, компьютерные технологии обработки и анализа геолого-геофизической информации. Автор более 100 научных публикаций.



ВАСИЛЬЕВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник маркшейдерского отдела ФГУП ВНИОГЕМ, действительный член Российского минералогического общества.

Научные интересы: компьютерное моделирование месторождений полезных ископаемых, прогнозирование технологических свойств и качества минерального сырья, визуализация горно-геологических данных. Автор более 70 публикаций, в том числе 2 учебных пособий.